



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**KAPACITA ŠACHTOVÉHO PŘELIVU
V ZÁVISLOSTI NA STÁDIÍCH PROUDĚNÍ**

SHAFT SPILLWAY CAPACITY DEPENDING ON FLOW STAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Monsport

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jakub Monsport
Název	Kapacita šachtového přelivu v závislosti na stádiích proudění
Vedoucí práce	prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 27. 5. 2020

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Čábelka, J; Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice – výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti. Academia Praha, 1987

Mäsiar, E.; Kamenský, J.: Hydraulika pre stavebných inžinierov (I). ALFA Bratislava, 1985

Boor, B.; Kunštátský, J.; Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968

Šulc, J.: Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního šachtového přelivu a odpadní štolý VD Karolinka. Výzkumná zpráva; LVV-FAST-VUT v Brně, 2006

Lazárek, F.: Stanovení konzumní křivky šachtového přelivu při použití úprav proudění v nálevce

Kybast, I.: Oblasti prúdenia šachtovým priepadom. Vodohospodársky časopis 35, 1987, str. 442–464

Vodohospodársky časopis 37, 1989, str. 195–210

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provést shrnutí a vyhodnocení dosavadních poznatků o kapacitě šachtového přelivu v závislosti na proudění v něm. Na hydraulickém modelu prověřit a vyhodnotit stádia proudění v prostoru šachty a hladiny v předpolí nálevky. Definovat vliv usměrňovacích pilířů v nálevce na kapacitu přelivu při nezahlném proudění v odpadní štole. Výsledky doplnit vhodnou fotodokumentací.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

První část této bakalářské práce je koncipována jako rešeršní. Shrnuje informace o přelivech a přelivných plochách. Podrobněji se zabývá šachtovými přelivy, u nichž se popisuje nejen jejich konstrukce, ale také stádia proudění v nálevce, šachtě, koleni i na začátku štoly hned za kolenem. Druhá část je praktická a je v ní provedeno měření Q/h charakteristiky na modelu šachtového přelivu s jeho různými modifikacemi.

KLÍČOVÁ SLOVA

šachtový přeliv, modelový výzkum, stádia proudění, vzduchová jádra, kapacita přelivu

ABSTRACT

The first part of this bachelor's thesis is drafted as a search. Summarizes information about spillways and in more detail focuses on shaft spillways and describes not only their construction but also flow stages in a funnel, shaft, elbow and at the beginning of the tunnel. The second part is practical and consists of the measurement of Q/h characteristics on the model of shaft spillway with some modifications.

KEYWORDS

shaft spillway, morning glory spillway, model research, flow stages, air cores, spillway capacity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jakub Monsport *Kapacita šachtového přelivu v závislosti na stádiích proudění*. Brno, 2021. 80 s., 1 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Kapacita šachtového přelivu v závislosti na stádiích proudění* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2021

Jakub Monsport
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Kapacita šachtového přelivu v závislosti na stádiích proudění* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2021

Jakub Monsport
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil panu prof. Janu Šulcovi, CSc. vděčnost za trpělivé vedení při tvorbě mé bakalářské práce. Velice si cením jeho rad a ochoty, ať už se jednalo o psaní, či měření.

Děkuji také dalším pracovníkům, kteří mi umožnili provádění měření na modelu.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu po dobu studia.

OBSAH

1	ÚVOD	4
1.1	Cíle	4
2	PŘELIVY	5
2.1	Dělení přelivů	5
2.1.1	Přelivy podle manipulovatelnosti	5
2.1.2	Přelivy podle tvaru a tloušťky přelivné stěny	5
2.1.3	Přelivy podle půdorysného uspořádání	7
2.1.4	Přepady podle ovlivnění dolní vodou	8
2.1.5	Přepady podle zúžení	8
2.2	Výpočet přepadového množství jezových přelivů	9
2.3	Výpočet přepadového množství ostrohranných přelivů	11
2.3.1	Bazinův přeliv	12
2.3.2	Další ostrohranné přelivy	14
3	PŘELIVNÉ PLOCHY	15
3.1	Beztlakové přelivné plochy	15
3.2	Tlakové přelivné plochy	16
3.2.1	Výhody	18
3.2.2	Nevýhody	18
3.3	Podtlakové přelivné plochy	18
3.3.1	Výhody	18
3.3.2	Nevýhody	19
3.3.3	Podmínky pro podtlakové plochy	19
4	ŠACHTOVÝ PŘELIV	22
4.1	Popis šachtového přelivu	23
4.2	Přepady přes šachtový přeliv podle ovlivnění	23
4.3	Přelivy podle tloušťky přelivné stěny	26
4.3.1	Ostrohranný šachtový přeliv	26
4.3.2	Šachtový přeliv klasického typu	27
4.3.3	Šachtový přeliv s prahem (podle Achutina)	28
5	STÁDIA PROUDĚNÍ	30
5.1	Stádium 1	30
5.2	Přechod mezi stádii 1 a 2	31

5.3	Stádium 2	32
5.4	Stádium 3	33
5.5	Přechod mezi stádii 3 a 4	34
5.6	Stádium 4	34
5.7	Stádium 5	35
5.8	Obecně ke stádiím proudění	35
6	USMĚRŇOVACÍ PRVKY	37
6.1	Usměrňovací pilíře	37
6.1.1	Výhody pilířů	37
6.1.2	Nevýhody pilířů	38
6.2	Usměrňovací žebra	38
6.2.1	Výhody žeber	38
6.2.2	Nevýhody žeber	39
6.3	Počet a tvar usměrňovacích prvků	39
7	PODMÍNKY BEZPEČNÉHO PROVOZU ŠACHTOVÝCH PŘELIVŮ	40
7.1	Štoly	42
7.1.1	Štoly o volné hladině	43
7.1.2	Štoly tlakové	43
7.2	Obecné doporučení	43
8	MODELOVÁ PODOBNOST	44
9	MODEL	46
9.1	Hydraulický okruh	50
9.2	Měřicí technika	50
10	MĚŘENÍ NA HYDRAULICKÉM MODELU	53
10.1	Postup měření	53
10.2	Bez pilířů	53
10.3	S pilíři	54
10.4	S pilíři a upraveným stropem	60
10.5	Vyhodnocení	63
10.5.1	Hladinový vír nad nálevkou	64
10.5.2	Dopad podtlakovosti	65
10.5.3	Křížové vlny	65
10.5.4	Zahlcení vstupní části odpadní štoly	66

10.5.5	Vliv stropu	67
11	ZÁVĚR	71
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
13	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
14	SEZNAM TABULEK.....	75
15	SEZNAM FOTOGRAFIÍ	76
16	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	78
17	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	79
18	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

1 ÚVOD

Předmětem práce je rozšíření stávajících poznatků o vlivu usměrňovacích pilířů, tvaru počátečního úseku odpadní štoly na hydraulickou kapacitu a stadia proudění v šachtovém přelivu. A následné pozorování těchto jevů a kapacity na hydraulickém modelu.

Měření probíhalo na modelu v měřítku 14,06, jenž je postaven v laboratoři VUT Fast na ulici Veveří v budově B. Skutečné vodní dílo, které je předlohou pro tento model nese název Vodní dílo Pod Bukovcom a leží 7,5 kilometru západně od Košic na slovenské řece Ida. Předmětný model byl postaven pro studii (Šulc, 2020), která byla objednána U. S. Steel Košice, s.r.o. a zhotovena v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Model (i samotné dílo) se skládá z nálevky, svislé šachty kruhového průřezu, zužujícího kolene, odpadní štoly s 2% podélným sklonem, vyústěné do koryta. Skutečné dílo pokračuje samotným korytem, které je na modelu simulováno ležatou nádrží s nastavitelnou úrovní vody v souladu s průtokovými podmínkami v korytě.

Jelikož se mají zkoumat kapacitu v závislosti na stádiích proudění, je vhodné si uvědomit, jaké formy proudění v jednotlivých částech bezpečnostního objektu lze očekávat.

U nálevky a svislé šachty se společně jedná o dvě formy a jednu přechodovou mezi nimi. Lze očekávat dokonalý přepad, kdy voda obtéká podél stěn nálevky. Tento jev bývá u nižších průtoků. Následuje také dokonalý přepad, ovšem tentokrát již voda není pouze podél stěn, ale místy se průtočný profil uzavře vodním sloupcem. Fáze mezi těmito jevy je taková, že podél stěn nálevky i téměř celé šachty je voda, ovšem dole, na konci šachty, dochází k takzvané dynamické hladině. Koleno, které následuje za šachtou, je již totiž zahlceno.

V koleni a štole se může vyskytnout jak proudění beztlakové, tak i proudění tlakové, které je ovšem legislativně nepřipustné. Sledovat budu i příčné vlny, které by mohly vést ke vzniku vodní tříště a tím ovlivnit kapacitu přelivu.

V posledním úseku, kde se jedná o výtok ze štoly do koryta se bude sledovat ovlivnění hladiny vody ve štole od hladiny v korytě. Tato pasáž původně neměla být součástí studie (Šulc, 2020), ovšem po zjištění vysoké míry ovlivnění kapacity právě od zpětného vzduší byla tato část zahrnuta.

Jednotlivá stadia budou rozebrána dále v textu.

Po prozkoumání stadií proudění na modelu a jejich vyhodnocení se práce zaměřuje na návrh takové úpravy, aby se i při co nejmenší přestavbě bezpečnostního objektu navýšila kapacita šachtového přelivu na maximum.

Práce byla vyhotovena při vedení prof. Ing. Jana Šulce, CSc., z Ústavu vodních staveb na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně.

1.1 Cíle

Pro tuto bakalářskou práci je cílem zdokumentovat stadia proudění v šachtovém přelivu a vyhodnotit kapacitu VD Pod Bukovcom při současném stavu konstrukce a současných legislativních požadavcích.

2 PŘELIVY

Stavební konstrukce zvaná přeliv je předurčena, aby po ní v jistých případech přetékala voda. Kdy a jak často se může lišit. Například v případě využití napříč korytem se očekává téměř neustálý přepad vody. Přeliv má v tomto případě za úkol vzdutí hladiny za účelem odběru, provzdušnění, či vyrovnání výškových rozdílů jako spádový stupeň. Naopak při použití přelivů u hrází se počítá s přepadem jen občas a jejich vzdouvací schopnost není brána v potaz.

V předešlém odstavci byly použity pojmy, které by bylo vhodné dovysvětlit. Termín přepad, ačkoli zní podobně, je velice odlišný od pojmu přeliv. Přepad je jev, kdy kapalina začíná přetékat přes přeliv. Zatímco přeliv je konstrukce, přes kterou má přepadající voda téct. Tomuto proudě vody se říká přepadový paprsek. Množina nejvyšších bodů v řezech jezů tvoří přelivnou hranu, rovněž označovanou jako korunu přelivu (Jandora a Šulc, 2006, s. 63–64).

2.1 Dělení přelivů

2.1.1 Přelivy podle manipulovatelnosti

Některé přelivy mohou být pohyblivé, některé pevné. Typickým případem pevného jezu je betonový jez. Na druhou stranu typických pohyblivých jezů je více. Pohyblivé jezy mohou být klapkové, válcové, segmentové anebo vakové. Každý z těchto druhů pohyblivých jezů se chová různě podle jeho polohy. U zdvižených klapek se realizuje ostrohranný přepad, zatímco při sklopení se jedná o přepad přes širokou korunu (Chvátal, 2006, s. 4; Jandora a Šulc, 2006, s. 77).

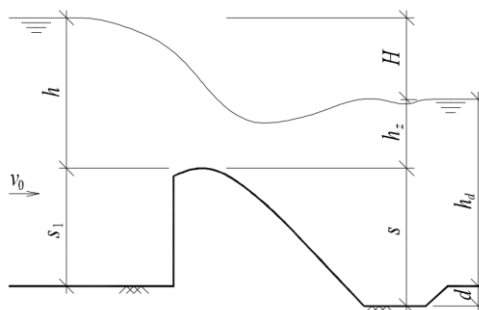
Výhoda pohyblivých jezů je jednoznačně možnost manipulace například z důvodu vyrovnání průtoku do náhonů. Jednoznačným negativem v porovnání s pevnými jezy je však složitější konstrukční řešení, větší náklady a další požadavky na provoz.

2.1.2 Přelivy podle tvaru a tloušťky přelivné stěny

Takto se dají přelivy rozdělit do čtyř skupin. Pro tuto bakalářskou práci je nejdůležitější skupina Zvláštní typy přelivů, do níž spadá také šachtový přeliv.

a) Jezové nebo přehradní přelivy

Jak už bylo zmiňováno výše, jezové přelivy mohou být jak pohyblivé, tak pevné. Odpovědí na otázku, proč se na tocích nepoužívají ostrohranné přelivy, které by dokázaly vodu vzdouvat, je ve statické nevhodnosti ostrohranných přelivů. Proto se jezové konstrukce odlišují.



Obr. 1 – Jezový přeliv (Jandora a Šulc, 2006, s. 70)

Příčné profily jezových přelivů jsou různé. Mohou být obdélníkového i lichoběžníkového průřezu, ovšem nejčastějším jsou tzv. proudnicové přelivné plochy.

Proudnicová přelivná plocha je odvozena od spodního obrysu přepadového paprsku, který volně přepadá přes ostrohranný přeliv. Proto se jezové přelivy dále dělí na beztlakové, podtlakové a tlakové (Jandora a Šulc, 2006, s. 72–73). Právě proudnicová plocha bude podstatnou pro tuto práci, neboť i šachtové přelivy bývají často s proudnicovou plochou.

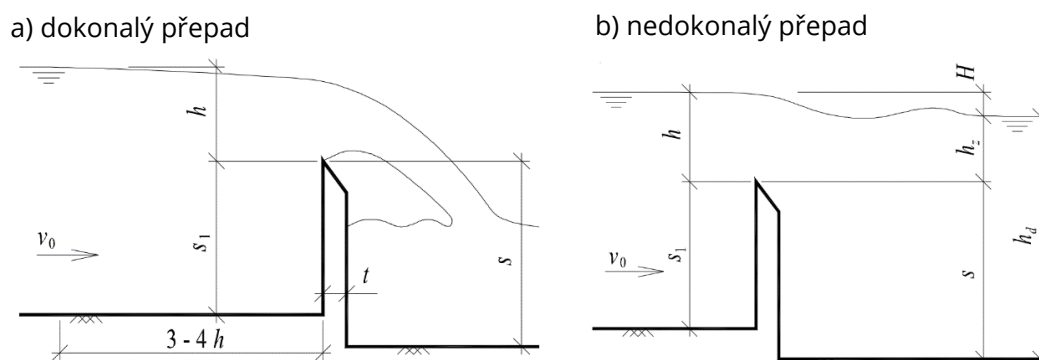
b) Ostrohranné přelivy

Kritériem pro tyto přelivy je tloušťka stěny t :

$$t < 0,66 \cdot h \quad (2.1)$$

Symbol	Popis	Jednotka
t	tloušťka stěny	m
h	výška přepadového paprsku	m

Aplikace tohoto konstrukčního řešení je především při měření průtoků. Jako takové nachází své využití ve stokových sítích nebo v inspekčních štolách přehrad, kde se měří průsak. Koruna má být jednostranně seříznuta do břitu viz Obr. 2. Nejznámějšími příklady ostrohranných přelivů jsou Ponceletův obdélníkový, Bazinův rovněž obdélníkový anebo Thomsonův trojúhelníkový. Vhodné také zmínit existenci Boorova ostrohranného šachtového přelivu.



Obr. 2 – Ostrohranný přeliv (Jandora a Šulc, 2006, s. 64)

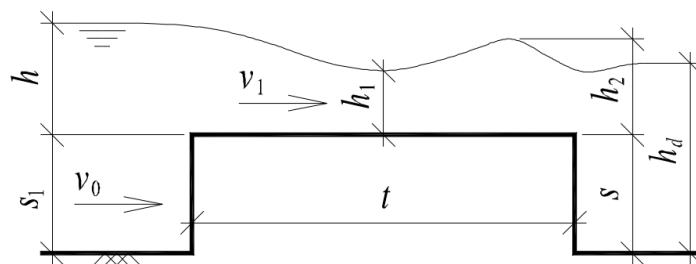
c) Přelivy se širokou korunou

Protiváhu předešlé možnosti tvoří varianta se širokou korunou.

$$t \geq (2 \text{ až } 3) \cdot h \quad (2.2)$$

Symbol	Popis	Jednotka
t	tloušťka stěny	m
h	výška přepadového paprsku	m

Koruna je v tomto případě tvořena širokým vodorovným prahem, který je oproti dnu toku vyvýšen. Kdyby nebyl vyvýšen, jednalo by se o pouhý spádový stupeň. Tloušťka koruny má zajistit převedení proudu co nejvíce rovnoběžně s korunou. Právě z pokusů při snaze dosáhnout zmiňované rovnoběžnosti vyplynula rovnice (2.2) (Jandora a Šulc, 2006, s. 77–80).



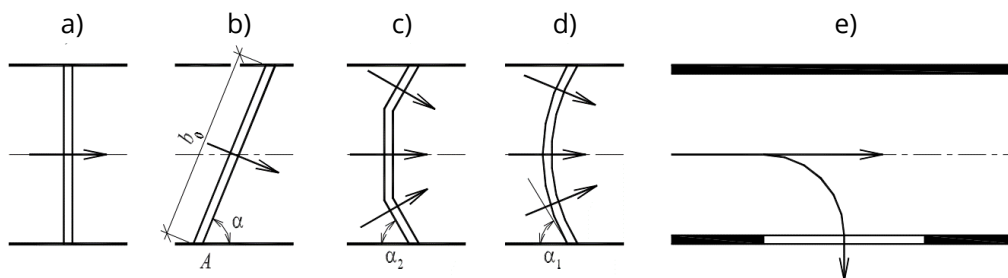
Obr. 3 – Přeliv se širokou korunou (Jandora a Šulc, 2006, s. 64)

d) Zvláštní typy přelivů

Zde se zařazují například boční přelivy anebo šachtové přelivy. O nich bude detailněji pojednáno dále.

2.1.3 Přelivy podle půdorysného uspořádání

Toto dělení je na základě vzájemné polohy přelivné hrany či koruny a nabíhajícímu proudu.



Obr. 4 – Půdorysy přelivů (Jandora a Šulc, 2006, s. 64–65)

a) Čelní

Proud vody nabíhá kolmo na přelivnou hranu.

b) Šikmý

Proud vody nabíhá šikmo na přelivnou hranu. Výhodou proti čelnímu je větší délka koruny. Toho se využívá pro snížení přepadové výšky h , což je vhodné pro průchod povodňových průtoků. Jeho nevýhodou je ovšem nesymetrický přepad vzhledem k ose toku, a tak dochází k přepadu na břeh v bodě A (Boor et al., 1968, s. 225).

c) Lomený

Jedná se o kombinaci čelního a šikmého, kdy je přeliv rozdělen na více částí a každá má jiný směr natékání proudu. I při výpočtu se přeliv rozdělí na jednotlivé části (Boor et al., 1968, s. 225).

d) Obloukový

Směr natékání je proměnný, stejně jako u lomeného, ale přeliv není rozdělen na části, hrana či koruna má tvar oblouku.

e) Boční (postranní)

Přelivná hrana je orientována ve směru proudu. Přeliv nepřehrazuje vodní tok.

2.1.4 Přepady podle ovlivnění dolní vodou

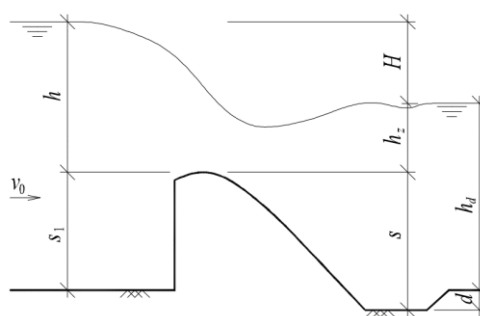
Dělit můžeme jak konstrukce, tak i jev. Podle toho, zda dolní voda dosahuje koruny přelivu dělíme na dvě skupiny (Jandora a Šulc, 2006, s. 64).

a) Dokonalý přepad

Množství vody přepadající přes korunu není spodní vodou ovlivněno. V prostorech přelivu se mění proudění nejprve na nadkritické, a to pokračuje až do dolní vody. Zde dochází k vodnímu skoku, kdy se režim proudění mění z bystřínného (nadkritického) do říčního (podkritického).

b) Nedokonalý přepad

Spodní voda již dosahuje nad úroveň přelivné hrany. Toto by mohlo způsobit ovlivnění přepadového množství. Ovšem tento efekt je nutno ověřit. Přepad může být nedokonalý, ale k ovlivnění přepadového množství nemusí dojít.



Obr. 5 – Nedokonalý přepad přes jez (Jandora a Šulc, 2006, s. 70)

Aby nastal nedokonalý přepad s ovlivněním horní vody, musí současně platit následující podmínky. Jestliže podmínky (2.3) platí, potom se ovlivnění promítne redukcí průtoku pomocí součinitele zatopení.

$$h_d + d > s; \frac{H}{s} < \left(\frac{H}{s}\right)_* \quad (2.3)$$

Symbol	Popis	Jednotka
h_d	úroveň hladiny dolní vody	m
d	zhloubení vývaru	m
s	odlehlost přelivné hrany od dolního dna	m
H	spád hladin	m
$\left(\frac{H}{s}\right)_*$	mezní hodnota pro nedokonalý přepad	m

2.1.5 Přepady podle zúžení

Na přepad má kromě dolní vody vliv i boční zúžení (Jandora a Šulc, 2006, s. 64).

a) Bez bočního zúžení

Šířka přelivu je shodná se šířkou žlabu či koryta.

b) S bočním zúžením

Šířka přelivu a žlabu či koryta nejsou shodné. Může to být způsobeno, jak menší přelivnou hranou, tak i postupným zúžením žlabu směrem k přelivu.

2.2 Výpočet přepadového množství jezových přelivů

Objem vody přepadlé přes jezové přelivy se vypočítá obecně podle následujícího výrazu.

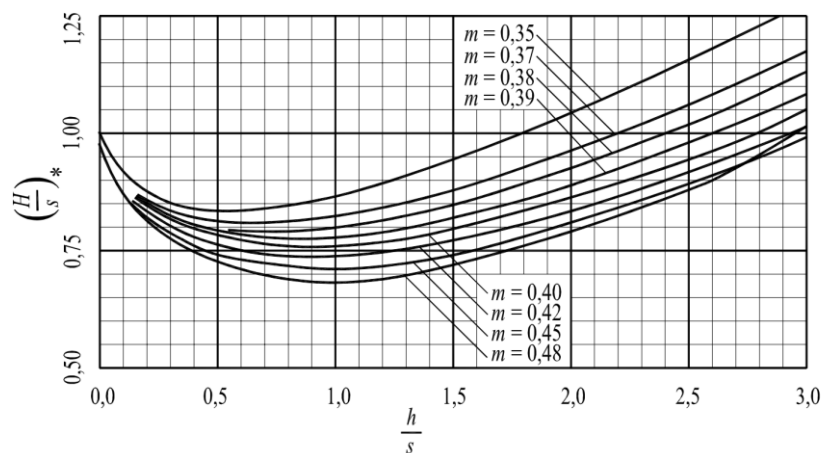
$$Q = \sigma_z \cdot \sigma_s \cdot m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot h_0^{3/2} \quad (2.4)$$

Symbol	Popis	Jednotka
σ_z	součinitel zatopení (dokonalý $\sigma_z=1$; nedokonalý $\sigma_z<1$)	
σ_s	součinitel šikmosti	
m	součinitel přepadu	
b_0	účinná šířka přelivu	m
h_0	energetická přepadová výška	m

Do této rovnice (2.4) však stále vstupuje několik veličin, které je ještě nejprve potřeba určit.

a) Určení součinitele zatopení

Prvním takovým případem je součinitel zatopení při nedokonalého přepadu, ten nastává při platnosti tzv. Bachmětěvových podmínek (2.3). V nich jsou definovány mezní hodnoty pro nedokonalý přepad.



Obr. 6 – Bachmětěvův grafikon mezních hodnot (Jandora, 2004, s. 33)

Z takto určené mezní hodnoty se přistoupí k samotnému zjištění velikosti součinitele zatopení σ_z .

Tab. 1 – Hodnoty součinitele zatopení pro přepad přes jez

h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z
0.40	0.990	0.65	0.940	0.74	0.869	0.82	0.756	0.90	0.575
0.45	0.986	0.66	0.930	0.75	0.858	0.84	0.719	0.92	0.515
0.50	0.980	0.68	0.921	0.76	0.846	0.85	0.699	0.94	0.449
0.55	0.970	0.70	0.906	0.78	0.820	0.86	0.677	0.95	0.412
0.60	0.960	0.72	0.889	0.80	0.790	0.88	0.629	1.00	0.000

b) Určení součinitele šikmosti

Zahrnuje do výpočtu vliv půdorysného uspořádání viz 2.1.3 Přelivy podle půdorysného uspořádání. Součinitel se vyjadřuje pomocí poměru $\frac{h}{s}$ (tyto veličiny byly specifikovány v rovnici (2.4)) a úhlu α , který svírá osa koruny a břehová hrana (Jandora a Šulc, 2006, s. 71).

Tab. 2 – Hodnoty součinitele šikmosti

h_z/s	0,4	0,3	0,2	0,1
$\alpha=90^\circ$	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha=75^\circ$	0,99	0,99	1,00	1,00
$\alpha=60^\circ$	0,94	0,96	0,97	0,99
$\alpha=45^\circ$	0,85	0,88	0,91	0,94

Z hodnot při velikosti úhlu $\alpha = 90^\circ$ je zřejmé, že buď můžeme součinitel šikmosti vynechat a provést výpočet pro čelní přeliv, anebo použít vzorec obecný se součinitelem $\sigma_s = 1$.

c) Určení součinitele přepadu

Určení součinitele přepadu m je rozdílné v závislosti na příčném průřezu jezu. Jeho velikost je určena pomocí poměru tloušťky t a výšky přepadového paprsku h v případě obdélníkového jezu. A v závislosti na sklonu stěn n , poměru výšky přepadového paprsku h a tloušťce t a na výšce jezu s_1 . Pro představu je přiložena tabulka s hodnotami pro obdélníkový průřez.

Tab. 3 – Hodnoty součinitele přepadu pro obdélníkový průřez jezu

t/h	1:2	2:3	1	2	3
m	0,42	0,41	0,37	0,33	0,32

Oba výše zmíněné typy mají součinitel přepadu poměrně malý, což vede k velkým hydraulickým ztrátám. Nejsou proto vhodné a moc se nepoužívají. V dnešní době se tak spíše setkáváme se speciálními typy přelivů, kde je hodnota součinitele přepadu definována většinou rovnicí.

d) Určení účinné šířky přelivu

Přelivná hrana, především u jezů, může být oproti korytu užší. V takovém případě se začínají projevovat boční kontrakce, které se ve vzorci projevují snížením šířky přelivu na takzvanou účinnou šířku.

$$b_0 = b - 0,1 \cdot n \cdot \xi \cdot h_0 \quad (2.5)$$

Symbol	Popis	Jednotka
b_0	účinná šířka přelivu	m
b	šířka přelivu	m
n	počet zúžení	
ξ	součinitel kontrakce	
h_0	energetická přepadová výška	m

Velikost součinitele kontrakce ξ se určuje podle tabulek. Hodnota je vždy menší než 1.

e) Určení energetické přepadové výšky

Součtem přepadové výšky a rychlostní výšky podle přítokové rychlosti získáme energetickou přepadovou výšku.

$$h_0 = h + \frac{\alpha \cdot v_0^2}{2 \cdot g} = h + k \quad (2.6)$$

Symbol	Popis	Jednotka
h_0	energetická přepadová výška	m
h	přepadová výška	m
α	Coriolisovo kritérium	
v_0	přítoková rychlost	m·s ⁻¹
g	tíhové zrychlení	m·s ⁻²
k	rychlostní výška	m

2.3 Výpočet přepadového množství ostrohranných přelivů

Kdy jsou přelivy považovány za ostrohranné bylo již definováno rovnicí (2.1). Jejich základní popis byl napsán v odstavci 2.1.2b).

Průtok u těchto konstrukcí je obecně dán tzv. Weisbachovou rovnicí.

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left[\left(h + \frac{\alpha \cdot v_0^2}{2 \cdot g} \right)^{3/2} - \left(\frac{\alpha \cdot v_0^2}{2 \cdot g} \right)^{3/2} \right] = \\
 &= \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left[h_0^{3/2} - k^{3/2} \right]
 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Symbol	Popis	Jednotka
Q	průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
μ	součinitel přepadu daného přelivu	
b	šířka přelivu	m
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	přepadová výška	m
α	Coriolisovo číslo	
v_0	počáteční rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
h_0	energetická přepadová výška	m
k	rychlostní výška	m

2.3.1 Bazinův přeliv

Jedná se o příklad obdélníkového ostrohranného přelivu bez bočního zúžení. Prostor pod přelivem je zavzdušněn k zajištění stabilizace přepadu. K výpočtu přepadového množství je použita rovnice, která vychází z rovnice Weisbachovy (2.7). Došlo pouze k vypuštění členu rychlostní výšky k a nahrazení součinu $\frac{2}{3}\mu$ za m_0 .

$$\frac{2}{3}\mu = m_0 \quad (2.8)$$

$$m = m_0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot v_0^2}{2 \cdot g \cdot h} \right)^{3/2} \quad (2.9)$$

Symbol	Popis	Jednotka
m	Bazinův součinitel přepadu	

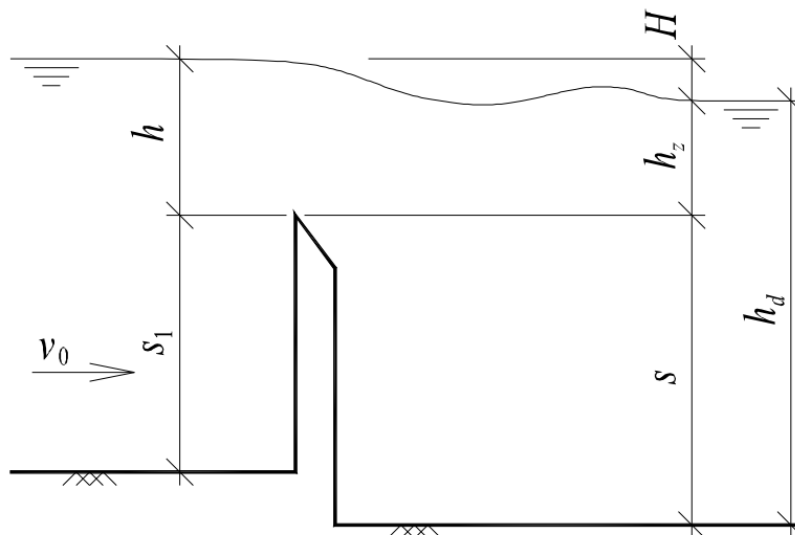
Díky zavedení Bazinova součinitele přepadu m došlo ke značnému zjednodušení. Součinitel totiž nese informaci o ztrátách, kontrakcích a přítokové rychlosti. Veškeré tyto veličiny jsou většinou těžce zjistitelné, a proto je jejich sjednocení do jednoho součinitele velice účelné. Došlo tak ke zjednodušení celé Weisbachovy rovnice (2.7).

$$\begin{aligned}
 Q &= \sigma_z \cdot m_0 \cdot b \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot v_0^2}{2 \cdot g \cdot h} \right)^{3/2} = \\
 &= \sigma_z \cdot m \cdot b \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2}
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Symbol	Popis	Jednotka
σ_z	součinitel zatopení (dokonalý $\sigma_z=1$; nedokonalý $\sigma_z<1$)	

a) Určení součinitele zatopení

Zjištění hodnoty součinitele zatopení se provádí pomocí rovnice (2.11). Nutné je však dodat i to, že nedokonalý přepad není tak obsáhle prozkoumán jako přepad dokonalý. Navíc jeho měření vyžaduje náročnější zařízení, a proto se Bazinův ostrohranný přeliv nedoporučuje k měření průtoků (Boor et al., 1968, s. 218).



Obr. 7 – Nedokonalý přepad na ostrohranném přelivu (Jandora a Šulc, 2006, s. 68)

$$\sigma_z = 1,05 \cdot \left(1 + 0,2 \cdot \frac{h_z}{s}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{H}{h}} \quad (2.11)$$

Symbol	Popis	Jednotka
h_z	odlehlost přelivné hrany od dolní vody	m
H	rozdíl mezi dolní a horní vodou	m
h	odlehlost přelivné hrany od horní vody	m

b) Určení součinitele přepadu podle Bazina

Bazinův součinitel přepadu se dá zjistit jak výpočtem pomocí rovnice (2.9), tak pomocí rovnice (2.12), která byla Bazinem stanovena empiricky.

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h + s_1}\right)^2\right] \quad (2.12)$$

Symbol	Popis	Jednotka
m	Bazinův součinitel přepadu	
h	přepadová výška	m
s_1	odlehlost přelivné hrany od horního dna	m

Platnost rovnice (2.12) s chybou $<1\%$ je ověřena při následujících podmínkách (Boor et al., 1968, s. 207):

$$0,1\text{ m} < h < 1,24\text{ m}$$

$$0,2\text{ m} < b < 2,00\text{ m}$$

$$0,2\text{ m} < s_1 < 2,00\text{ m}$$

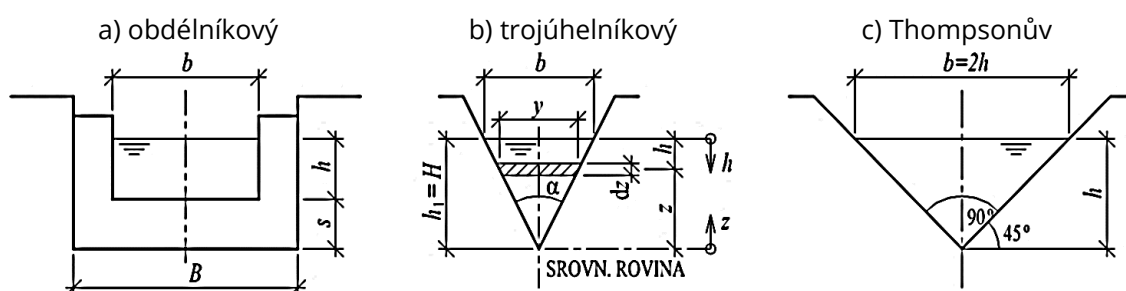
Kromě této rovnice (2.12) od Bazina, existují i další. Například od Freseho, Rehbocka, či Švýcarského spolku inženýrů a architektů. Ovšem tyto vzorce dávají menší hodnoty než rovnice (2.12) od Bazina. Pravděpodobně to bude zapříčiněno komplexnějším měřením a delším žlabem v podání Bazina oproti ostatním (Boor et al., 1968, s. 207).

c) Určení přepadové výšky

Přepadová výška h se získává měřením. Důležité je však dodat, že ideální poloha pro měření hladiny je $(3 \text{ až } 4) \times h$ protiproudě před přelivem. Tento posun zajišťuje dostatečné přiblížení se k rovnovážnému stavu vodní hladiny neovlivněnému přelivem (Boor et al., 1968, s. 205).

2.3.2 Další ostrohranné přelivy

Jedná se především o přelivy se zúžením na bocích o různých tvarech. Jako základní se dá uvést obdélníkový neboli Ponceletův přeliv. Dále existují trojúhelníkové rovnoramenné a speciální variantou je Thompsonův. Ten zkoumal přeliv pro $\alpha = 90^\circ$, tedy pravoúhlý rovnoramenný trojúhelník a zjistil konstantní hodnotu součinitele přepadu $m = 0,316$ (Boor et al., 1968, s. 213).



Obr. 8 – Ostatní ostrohranné přelivy (Jandora, 2004, s. 31)

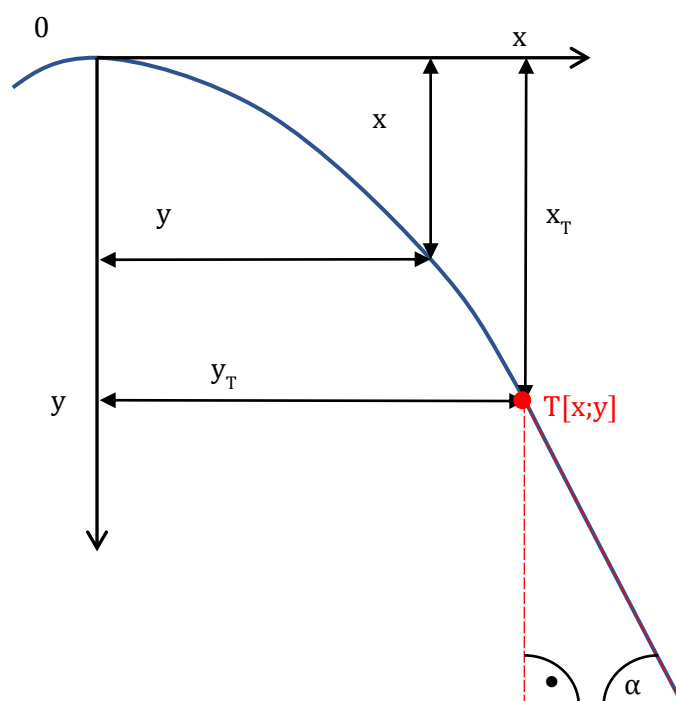
Kromě výše zmíněných existují i přelivy parabolického, kruhového či lichoběžníkového průřezu.

3 PŘELIVNÉ PLOCHY

Definice přelivných ploch a jejich smysl je napsán výše v odstavci 2.1.2a) Jezové nebo přehradní přelivy. Jejich využití je poměrně časté i na přelivech údolních přehrad, jejich součinitel přepadu m je poměrně vysoký, což je samozřejmě výhodou.

Přelivné plochy se zabývají především oblastí koruny přelivu a těsně poproudě za ní. Oblast před korunou (záporné souřadnice x) bývá často řešena pomocí navázání na Bazinovu křivku. Oblast dále za samotnou přelivnou plochou se zase navazuje na plochu danou základním trojúhelníkem, jehož přepona má sklon vzdušného líce vzdouvacího objektu. Bod, kde dochází k přechodu se nazývá dotykový bod T .

Základní trojúhelník je pravoúhlý a úhel mezi přeponou a vodorovnou rovinou je uváděn v procentech $p [\%] = 100 \cdot \cotg(\alpha)$. Jeho velikost vyplývá ze statiky konstrukce, podle toho se také mění souřadnice dotykového bodu $T[x; y]$.



Obr. 9 – Souřadný systém, dotykový bod a základní trojúhelník přelivných ploch

3.1 Beztlakové přelivné plochy

Spodní obrys paprsku a přelivná plocha jsou totožné. Plocha paprsek nepodpírá, jen ji kopíruje, paprsek na plochu netlačí ani se od ní neodlepí, jen k ní doléhá. Samozřejmě při nižších průtocích, než jsou návrhové, a tudíž i při nižší hodnotě přepadové výšky, než je návrhová, se začíná plocha chovat jako tlaková (Boor et al., 1968, s. 227). Paprsku se totiž snižuje energie, čímž se snižuje vzdálenost dopadu, a paprsek se tak začne opírat o přelivnou plochu.

Měřením spodní obalové křivky paprsku se zabýval Scimemi. Provedené pokusy transformoval na velikost jednotkové přepadové výšky (např. $h = 1$ m) a vyplynula mu následující rovnice.

$$y = a \cdot x^n \quad (3.1)$$

Symbol	Popis	Jednotka
y	vertikální souřadnice	m
a	parametr ($a = 0,5$)	
x	horizontální souřadnice	m
n	parametr ($n = 1,85$)	

Tab. 4 – Souřadnice typové přelivné Scimemiho plochy pro $h = 1,0$

x	y	x	y	x	y
-0.30	0.126	0.1	0.007	1.8	1.483
-0.25	0.064	0.3	0.054	2.0	1.798
-0.20	0.036	0.5	0.139	2.5	2.727
-0.15	0.017	0.7	0.258	3.0	3.817
-0.10	0.006	1.0	0.500	3.5	5.075
-0.05	0.001	1.3	0.813	4.0	6.500
0.00	0.000	1.5	1.095	4.5	8.080

Tab. 5 – Souřadnice dotykového bodu T Scimemiho typové přelivné plochy

p [%]	x_T	y_T	p [%]	x_T	y_T
50.0	2.476	2.677	75.0	1.536	1.107
66.7	1.766	1.432	76.0	1.513	1.077
68.0	1.725	1.371	78.0	1.468	1.017
70.0	1.667	1.288	80.0	1.425	0.963
72.0	1.613	1.211	100.0	1.096	0.593
74.0	1.562	1.141			

Ačkoli je rovnice odvozena pro přepadovou výšku $h = 1$, a také hodnoty v Tab. 4 jsou pro $h = 1$, tak obecně jsou si přepadové paprsky podobné podle přepadové výšky h , a tak stačí hodnoty souřadnic vynásobit návrhovou přepadovou výškou h_n a získáme tak souřadnice pro potřebnou konstrukci přepadové plochy. Záporné hodnoty souřadnice x , které jsou potřebné pro konstrukci před korunou jsou převzaty z Bazinovy křivky. Při přepadu návrhového průtoku přes Scimemiho beztlakovou přelivnou plochu je hodnota součinitele přepadu.

$$m_n = 0,51$$

3.2 Tlakové přelivné plochy

Jak již bylo zjednodušeně popsáno výše. Tlakové přelivné plochy podepírají přepadový paprsek. Snižuje se tak riziko vzniku podtlakových ploch, ovšem zároveň tím klesá hodnota součinitele přepadu m . Příkladem tlakové přelivné plochy je plocha Smetanova. Její obalová křivka je odvozena od Scimemiho, avšak aby došlo k podepření a tlačení na paprsek, tak se hodnoty souřadnic násobí součinitelem $\lambda > 1$ (Boor et al., 1968, s. 228).

$$x_z = \lambda \cdot x; y_z = \lambda \cdot y \quad (3.2)$$

Symbol	Popis	Jednotka
x_z	x souřadnice Smetanovy plochy	m
λ	součinitel	
x	x souřadnice Scimemiho plochy	m
y_z	y souřadnice Smetanovy plochy	m
y	y souřadnice Scimemiho plochy	m

Při výpočtech podle Smetany se uvažuje $\lambda = 1,1$. Po dosazení do rovnice Scimemiho dostáváme rovnici Smetanovu.

$$y_z = 0,46108 \cdot x_z^{1,85} \quad (3.3)$$

Symbol	Popis	Jednotka
y_z	y souřadnice Smetanovy plochy	m
x_z	x souřadnice Smetanovy plochy	m

Rovnice typové plochy, která udává křivku zdíva, je však pro výšku přepadového paprsku $h = 1,1 = \lambda$ (Boor et al., 1968, s. 229). Zde je vhodné podotknout, že Scimemiho rovnice (3.1) je definována pro výšku přepadového paprsku $h = 1$.

Tab. 6 – Souřadnice Smetanovy typové přelivné plochy pro $h = 1,0$

x_z	y_z	x_z	y_z	x_z	y_z
-0.300	0.126	0.1	0.007	1.7	1.231
-0.250	0.064	0.3	0.050	2.2	1.983
-0.200	0.036	0.5	0.128	2.7	2.896
-0.150	0.017	0.7	0.238	3.2	3.996
-0.100	0.006	0.9	0.379	3.7	5.187
-0.050	0.001	1.1	0.550	4.2	6.558
0.000	0.000	1.4	0.859		

Tab. 7 – Souřadnice dotykového bodu T Smetanovy typové přelivné plochy

p [%]	x_T	y_T	p [%]	x_T	y_T
70	1.834	1.417	76	1.655	1.184
71	1.804	1.373	77	1.639	1.151
72	1.774	1.332	78	1.614	1.119
73	1.745	1.292	79	1.590	1.088
74	1.717	1.256	80	1.568	1.059
75	1.691	1.219	82	1.524	1.004

Dále Smetana stanovil na základě pokusů návrhový součinitel přepadu.

$$m_n = 0,499$$

Návrhový součinitel přepadu je zároveň nejvyšší součinitel, který můžeme očekávat. Při nižších průtocích, respektive přepadových výškách, se jeho hodnota snižuje. Hodnota součinitele, jehož přepadová výška $h < h_n$ se vypočítá podle následující rovnice.

$$m = 0,499 \cdot \left(0,63 + 0,37 \sqrt{\frac{h}{h_n}} \right) \quad (3.4)$$

Symbol	Popis	Jednotka
m	součinitel přepadu	
h	přepadová výška	m
h_n	návrhová přepadová výška	m

3.2.1 Výhody

Bezpečnost

Tlakové plochy zvyšují zabezpečení proti vzniku podtlaků, které jsou pro konstrukce obecně nebezpečnější.

Neupouštění od tlakové plochy

Na rozdíl od ploch beztlakových se u tlakových ploch setkáváme vždy s podepíráním paprsku, na které je plocha dimenzovaná. U beztlakových ploch se totiž o vyložení beztlakové proudění jedná pouze při návrhovém průtoku, jinak při nižších výškách přechází plocha v tlakovou. Tato jistota se dá považovat za výhodu tlakových ploch (Boor et al., 1968, s. 228).

3.2.2 Nevýhody

Nižší součinitel přepadu

Jak bylo uvedeno výše, vyšší bezpečnost tlakových ploch je na úkor nižšího součinitele přepadu, a tak nižší kapacity (Boor et al., 1968, s. 228).

3.3 Podtlakové přelivné plochy

Princip podtlakových ploch je založený na posunutí zaoblení koruny dál od křivky přepadového paprsku bez dotování vzduchu. Přepadající voda tak strhává vzduch s sebou až dojde ke vzniku podtlaku pod paprskem. Důsledkem podtlaku je přibližování paprsku ke konstrukci a od určitých velikostí podtlaku dochází k přilnutí (Boor et al., 1968, s. 230).

3.3.1 Výhody

Vyšší součinitel přepadu

Využití podtlakové plochy vede k přiblížení paprsku k přelivu, což zvyšuje hodnotu součinitele přepadu m . Tudíž by mohly být někdy tyto plochy výhodnější než ostatní typy (Boor et al., 1968, s. 230).

3.3.2 Nevýhody

Koroze betonu

Při vyšších podtlacích hrozí, že by atmosférický vzduch protrhl paprsek přepadající vody a pronikl tak do oblasti podtlaku, čímž by dočasně vyrovnal tlak. Ten by ovšem vzápětí opět klesl. Tento jev by probíhal periodicky. Právě neustálé změny tlaku by mohly vést k destrukci betonu.

Rezonance

Kromě koroze betonu jsou opakované jevy nebezpečné ještě z jednoho pohledu. Jedná se o přenášení kmitání konstrukcí na další okolní objekty. V případě, že by se frekvence těchto přenášených kmitů přibližovala vlastní frekvenci dalších objektů, hrozila by ztráta jejich stability vlivem rezonance. Problém je palčivější u pohyblivých konstrukcí jako například segmenty a klapky (Boor et al., 1968, s. 226).

Dřívější ovlivnění dolní vodou

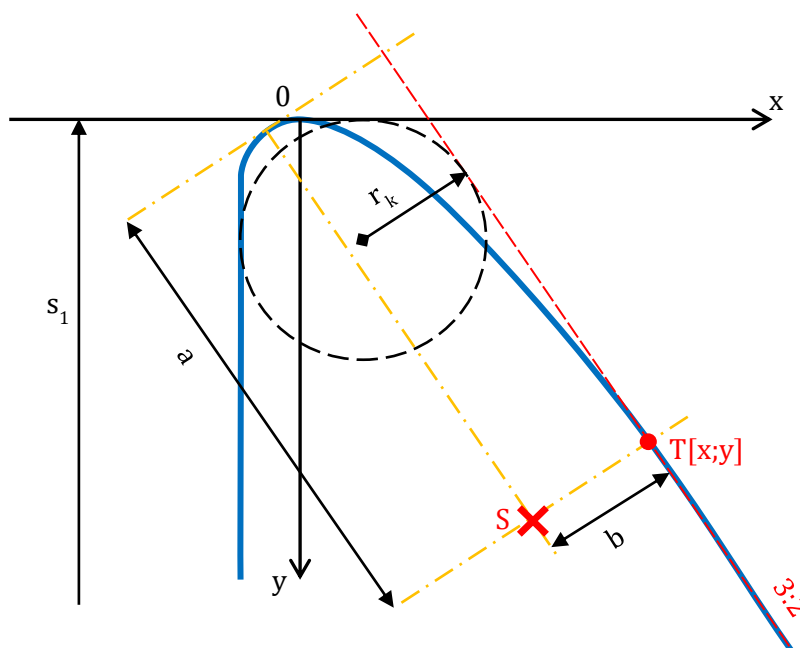
Na podtlakové plochy má vliv dolní voda dříve, než dosáhne přelivné hrany, protože snižuje podtlak. Proto například Rozanov uvažuje zatopení již při splnění podmínky uvedené v rovnici (3.5) (Boor et al., 1968, s. 231).

3.3.3 Podmínky pro podtlakové plochy

Pro konstrukce podtlakových ploch jsou stanoveny podmínky, které by měly zajistit, aby podtlak vznikl jen na koruně anebo blízko pod ní. Navíc je určen minimální tlak, při němž ještě nedojde k protržení přepadového paprsku atmosférickým vzduchem, a tak ani nedojde k pulzacím.

$$p_{va} \sim 60 \text{ až } 70 \text{ kPa}$$

Podrobnější zkoumání podtlakových ploch prováděl Rozanov a jako nejvhodnější byla vyhodnocena eliptická podtlaková plocha. Ideální poměr os elipsy se nachází v intervalu 2 až 3 a hlavní osa je ve sklonu 3:2. Rozložení poloos a situování je znázorněno na Obr. 10.



Obr. 10 – Poloosy podtlakové elipsovité přelivné plochy

Kružnice, jejíž poloměr je v Obr. 10 označen jako r_k je použita i u přelivů s kruhovým zaoblením koruny. Jedná se o tzv. náhradní kružnici a je definována vždy třemi tečnami. Jednou je vodorovná hranice určující odlehlost s_1 (odlehlost přelivné hrany od horního dna), druhou tečnou je přepóna navazujícího základního trojúhelníka a poslední třetí tečna je vertikální na straně horní vody.

Tab. 8 – Souřadnice eliptické podtlakové plochy při $r_k = 1,0$

Číslo bodu	$a/b = 1$		$a/b = 2$		$a/b = 3$	
	x	y	x	y	x	y
1	-1.000	1.000	-0.602	0.830	-0.472	0.629
2	-0.736	0.330	-0.560	0.248	0.308	0.180
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.585	0.208	0.620	0.226	0.541	0.173
5	1.377	1.302	1.242	0.730	1.022	0.503
6	2.434	2.896	1.682	1.278	1.456	0.890
7	3.670	4.717	2.327	2.246	1.855	1.320
8	5.462	7.424	2.956	3.189	2.240	1.792
9			4.450	5.430	2.560	2.270
10			5.299	6.704	3.139	3.214
11			6.195	8.048	4.685	5.453
12					5.561	6.767
13					6.442	8.088

Hodnoty v Tab. 8 jsou pro velikost náhradního poloměru $r_k = 1$ a souřadnice bodů požadované plochy získáme vynásobením těchto hodnot z tabulky velikostí požadovaného náhradního poloměru (Boor et al., 1968, s. 231). Na rozdíl od beztlakových a tlakových přelivných ploch je podtlaková Rozanovova přelivná plocha definována i pro záporné souřadnice x . Zatímco dotykový bod T je zde definován shodně.

Tab. 9 – Hodnoty součinitele přepadu eliptické plochy

h_n/r_k	Součinitel přepadu m			h_n/r_k	Součinitel přepadu m		
	$a/b = 1$	$a/b = 2$	$a/b = 3$		$a/b = 1$	$a/b = 2$	$a/b = 3$
1.0	0.846	0.487	0.495	2.4	0.538	0.554	0.557
1.2	0.497	0.500	0.509	2.6	0.543	0.560	0.562
1.4	0.506	0.512	0.520	2.8	0.549	0.565	0.566
1.6	0.513	0.521	0.530	3.0	0.553	0.569	0.570
1.8	0.521	0.531	0.537	3.2	0.557	0.573	0.575
2.0	0.526	0.540	0.544	3.4	0.560	0.577	0.577
2.2	0.533	0.548	0.551				

Vliv dolní vody Rozanov řeší jiným přístupem k zatopení (Boor et al., 1968, s. 231).

$$\frac{h_z}{h} \leq -0,15 \quad (3.5)$$

Symbol	Popis	Jednotka
h_z	odlehlost dolní hladiny a přelivné hrany	m
h	výška přepadového paprsku	m

Tab. 10 – Součinitel zatopení eliptické přelivné plochy

h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z	h_z/h	σ_z
-0.15	1.000	0.20	0.94	0.60	0.723
-0.10	0.999	0.30	0.90	0.70	0.642
0.00	0.990	0.40	0.85	0.80	0.538
0.10	0.971	0.50	0.79	0.90	0.390
				1.00	0.000

Obecně lze pro podtlakové plochy konstatovat, že jejich obrovskou výhodou je vyšší součinitel přepadu. Ten je bohužel vyvážen větším rizikem, se kterým se však dá vypořádat. Co se týče dřívějšího nástupu součinitele zatopení σ_z do výpočtu, tak je jasné, že snižuje kapacitu, nicméně při vynásobení přepadového součinitele a součinitele zatopení podtlakové plochy a po porovnání se samotným přepadovým součinitelem tlakových ploch, nám stále vychází lepší hodnota (vyšší kapacita).

4 ŠACHTOVÝ PŘELIV

Šachtový přeliv je jednou z variant bezpečnostního objektu přehrady. Objekty přehrad obecně jsou bezpečnostní přelivy, spodní výpusti a odběrné objekty. Bezpečnostní přelivy jsou nepostradatelné na všech nádržích. Někdy se vyskytují samostatně a někdy v rámci tzv. sdružených objektů, zejména u nízkých hrází.

Sdružené objekty sestávají většinou z výpustí, odběrného objektu a přelivu. Nicméně tato varianta je typičtější především pro malé vodní nádrže. Naopak se ani použití šachtového přelivu, dle ČSN 75 2410, z důvodu možného ucpání, na malých vodních nádržích nedoporučuje (ČSN 75 2410, 2011).

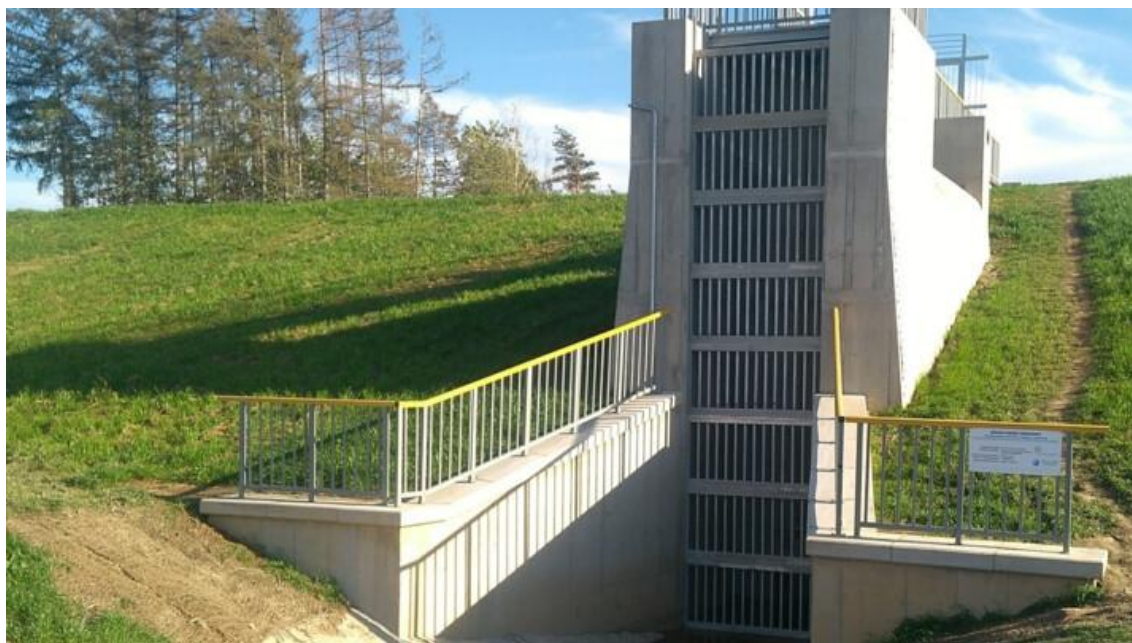


Foto. 1 – Sdružený objekt (POLAR televize Ostrava, s.r.o., 2020)

Sdružený objekt na Foto. 1 je zrovna kombinací spodních výpustí nacházející se za česlemi, které vidíme vepředu a bezpečnostního přelivu. Ten je viditelný na boční straně objektu.

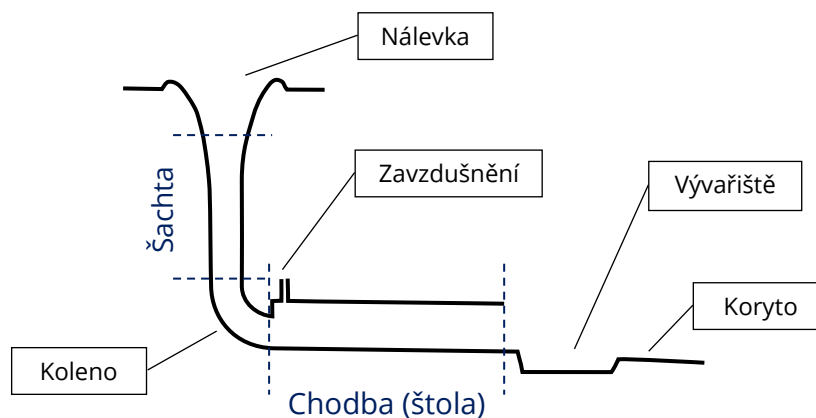
Bezpečnostní přelivy mají, již podle názvu, za úkol bezpečně převést velkou vodu z nádrže za hráz. Mohou být přímé, boční, kašnové, šachtové a další (Veselý, 2004, s. 53).

U sypaných přehrad se můžeme setkat buď s bočním přelivem, na který navazuje skluz, anebo právě s šachtovým přelivem. Důvod, proč se nepoužívají jiné typy bezpečnostních přelivů je bezpečnost a stabilita tělesa hráze. Mezi těmito dvěma přelivy se rozhoduje podle prostorových možností. Vyšší spolehlivost je na straně bočního přelivu, ovšem menší nároky na morfologii má zase šachtový přeliv (Kratochvíl et al., 1987, s. 55).

U betonových přehrad se s šachtovým přelivem setkáváme tam, kde přijdou vhod jeho specifické požadavky na umístění.

4.1 Popis šachtového přelivu

Dvěma základními prvky přelivu jsou vertikální šachta a horizontální chodba (štola). Na začátku šachty je nálevka, spoj mezi šachtou a chodbou je zajištěn kolenem a za chodbou většinou vidíme vývařiště.



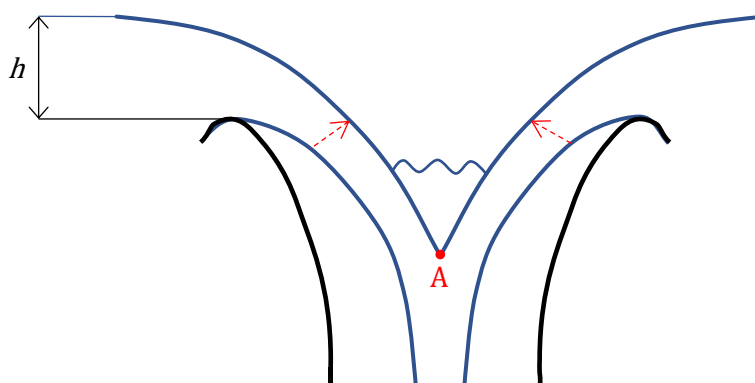
Obr. 11 – Schéma šachtového přelivu

4.2 Přepady přes šachtový přeliv podle ovlivnění

I u šachtového přelivu rozeznáváme přepad dokonalý a nedokonalý.

a) Dokonalý přepad přes šachtový přeliv

Obdobně jako u přepadů přes jezová tělesa se jedná o dokonalý přepad, dokud není přepadové množství ovlivněno dolní vodou. U šachtových přelivů jsou v případě nižších průtoků přepadající paprsky přilnuté k nálevce a stěně šachty a se zvyšujícím se průtokem se začínají přibližovat ke středu a tím i samy k sobě, což však neodporuje dokonalému přepadu.



Obr. 12 – Přibližující se přepadové paprsky

Dokonalý přepad pokračuje i v případě spojení paprsků v bodě A. Paprsky se spojí, nad bodem jejich spojení vznikne směs vody a vzduchu, ale pokud je vtok šachty nezahlcený, jedná se stále o dokonalý přepad (Boor et al., 1968, s. 239). Hranice, po kterou se jedná o dokonalý přepad je dána rovnicí (4.1).

$$\frac{h}{D} \leq 0,225 \quad (4.1)$$

Symbol	Popis	Jednotka
h	přepadová výška	m
D	průměr šachty	m

Výše popsané situace, kdy se paprsky postupně přibližují až se spojí, se počítají shodně pomocí rovnice (4.2). Jedná se o obdobný přístup jako při přepadu přes jezové těleso. Situacím odpovídá v Obr. 13 křivka *a*.

$$Q = m \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} = m \cdot l \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \quad (4.2)$$

Symbol	Popis	Jednotka
Q	průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
m	součinitel přepadu	
$2 \cdot \pi \cdot r$	délka (obvod) přelivné hrany/koruny	m
l	délka přelivné hrany/koruny	
r	poloměr nálevky	m
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	přepadová výška	m

Vzhledem k tomu, že přítoková rychlost v nádržích je prakticky nulová, tak se při určování přepadové výšky h nemusíme zabývat rychlostní výškou, kterou zde zanedbáváme.

b) Nedokonalý přepad přes šachtový přeliv

K nedokonalému přepadu se dostáváme až při zahlcení přelivu. Hladina v nálevce ovlivňuje hladinu h v nádrži. Číselně se tato mez vyjadřuje následovně:

$$\frac{h}{D} > 0,225 \quad (4.3)$$

Symbol	Popis	Jednotka
h	přepadová výška	m
D	průměr šachty	m

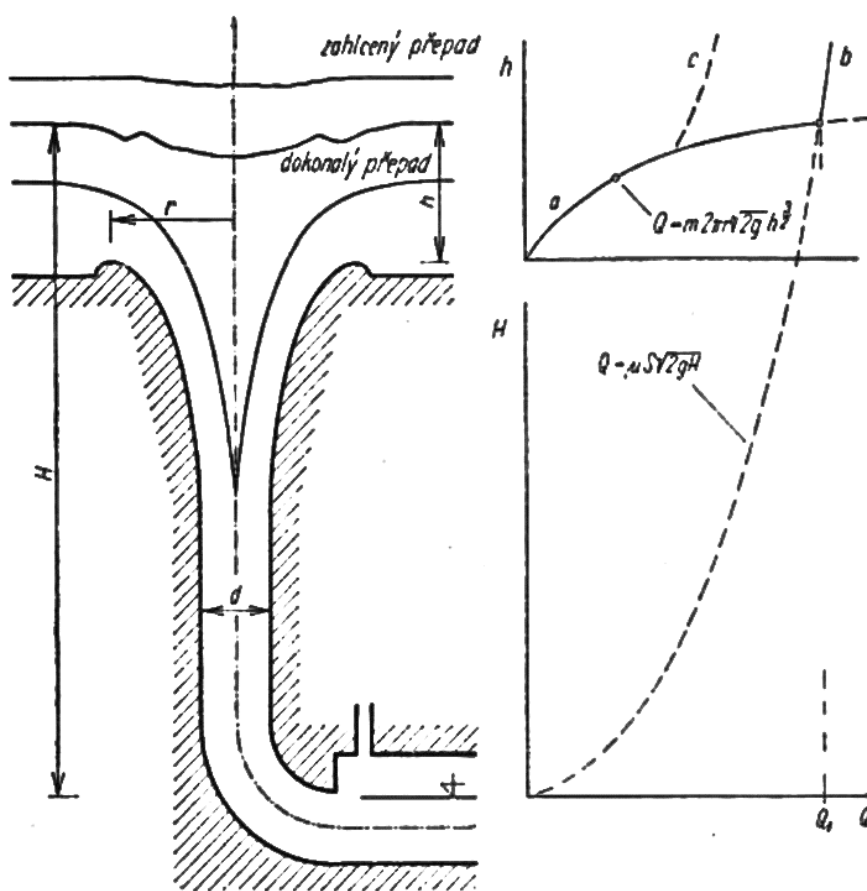
Při tomto stavu se již jedná o případ výtoku zúženým otvorem. Za otvor je považováno většinou koleno pod šachtou (Boor et al., 1968, s. 239; Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 135).

V Obr. 13 je nedokonalý přepad zobrazen dvěma křivkami *b*, *c*.

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (4.4)$$

Symbol	Popis	Jednotka
Q	průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
μ	součinitel výtoku	
S	průtočná plocha	m^2
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
H	tlačná výška	m

Nesmíme ovšem zapomenout na vliv hladinových vírů. Ty výrazně snižují kapacitu a přesouvají průtok z křivky b směrem ke křivce c. Rovněž se nesmí zapomenout na vliv provzdušnění proudu. Oba tyto vlivy je vhodné testovat na hydraulických modelech (Boor et al., 1968, s. 240). Eliminace vlivu hladinových vírů se provádí například pomocí pilířů. Jejich bližší popis je v kapitole 6 Usměrnovací prvky.



Obr. 13 – Fáze přepadů a jejich rovnice na šachtovém přelivu (Boor et al., 1968, s. 238)

4.3 Přelivy podle tloušťky přelivné stěny

Obdobně jako u jezových konstrukcí i šachtové přelivy mohou být o různých šířkách přelivné stěny.

4.3.1 Ostrohranný šachtový přeliv

Jedná se o jednoduchý typ šachtového přelivu. Jednoduchý, protože se může jednat i o pouhé potrubí skrz něž je voda odváděna, anebo přiváděna do nádrže. V případě přívodu do nádrže se jev nazývá negativní přepad (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 132).

a) Přepad přes ostrohranný šachtový přeliv podle Wagnera

Wagner použil kruhový průřez šachty a pro dokonalý přepad se přepadové množství počítá podle rovnice (4.3). V případě dostatečného zavzdušnění prostoru pod paprskem a poměru $\frac{h}{r} = 0,2$ se součinitel přepadu $m = 0,412$ (Boor et al., 1968, s. 239).

b) Přepad přes ostrohranný šachtový přeliv podle Goureyho

Gourey se používá za předpokladu splnění podmínky $h < \frac{D}{5}$.

$$Q = k \cdot l \cdot h^{1,42} \quad (4.5)$$

Symbol	Popis	Jednotka
Q	průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
k	součinitel závislý na průměru přelivu	
h	přepadová výška	m

Do Goureyho vztahu (4.5) musí veškeré hodnoty vstupovat v základních jednotkách.

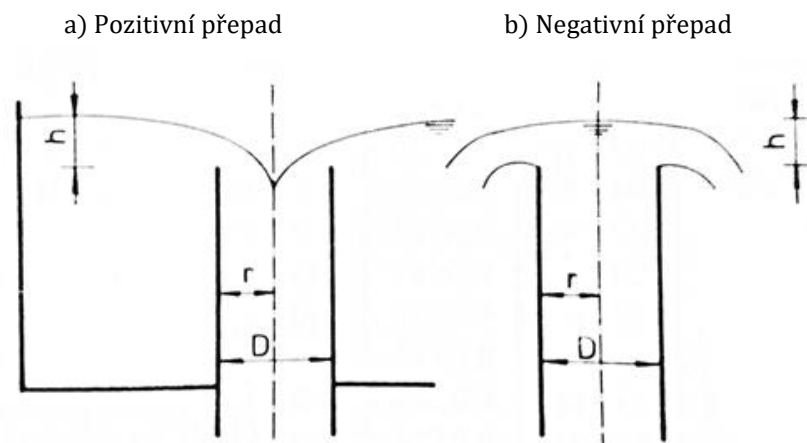
c) Negativní přepad přes ostrohranný šachtový přeliv podle Nougara

S obdobou negativního přepadu se můžeme setkat i například u kořenových čistíren, kde je potrubí umístěno v regulační šachtě, aby se dala kontrolovat výška vody.

Podle Nougara platí pro negativní přepad následující vztah (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 133).

$$Q = \pi \cdot D \cdot \sqrt{2 \cdot g} \left(0,0054 \cdot \frac{D}{h} + 0,4114 \right) \cdot h^{3/2} \quad (4.6)$$

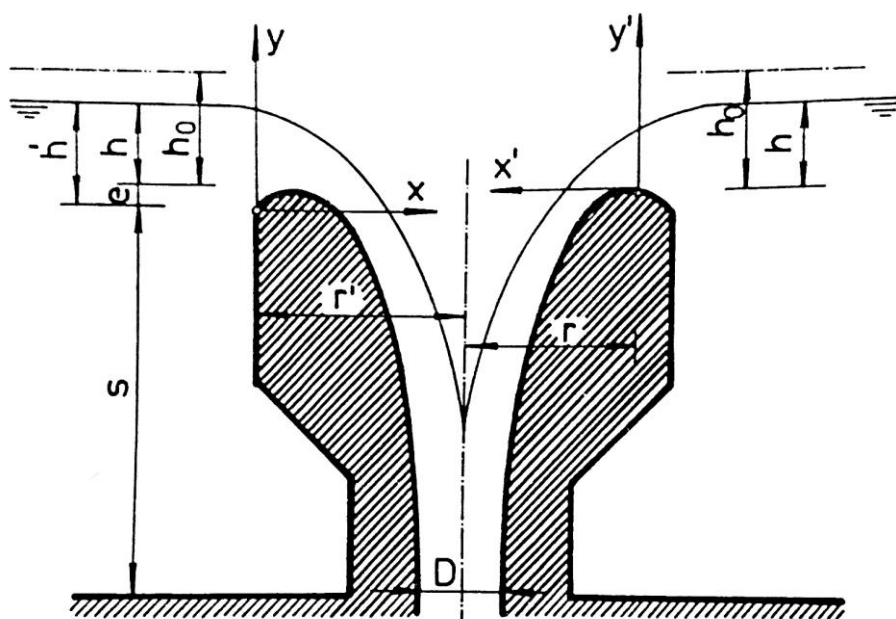
Symbol	Popis	Jednotka
Q	průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
D	průměr potrubí (šachty)	m
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	přepadová výška	m



Obr. 14 – Přepad přes kruhový ostrohranný přepad (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 133)

4.3.2 Šachtový přeliv klasického typu

Výše v odstavci bylo uvedeno, že šachtové přelivy bývají často používány jako bezpečnostní k odvádění povodňových vod především u nádrží se sypanými hrázemi. Tento dodatek se týkal právě šachtového přelivu klasického typu či přelivu s prahem. Nálevka začíná proudnicovou plochou, na kterou navazuje šachta a dále následuje koleno viz Obr. 11 – Schéma šachtového přelivu.



Obr. 15 – Šachtový přeliv s proudnicovou plochou (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 133)

Výpočet přepadového množství dokonalého přepadu se provádí pomocí vztahu (4.2). S tím, že délka přelivné hrany $l = 2 \cdot \pi \cdot r$ se může při výpočtu redukovat o tloušťku pilířů. V takovém případě se veličina jmenuje efektivní (účinná) délka přelivné hrany a značí se l_0 a vypočítá se podle odstavce 2.2d) Určení účinné šířky přelivu (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 134).

Při přechodu do nedokonalého přepadu $\frac{h}{D} > 0,225$ se začíná jednat o zatopený výtok otvorem (šachtou). Následně pro hodnoty $\frac{h}{D} > 0,345$ se může vytvořit vtokový vír, jenž snižuje kapacitu.

a) Proudnicová plocha podle Haindla

Souřadnice plochy jsou definovány vztahem níže.

$$y' = \frac{x'^2}{8} \quad (4.7)$$

Symbol	Popis	Jednotka
y'	y souřadnice	m
x'	x souřadnice	m

Součinitel přepadu m se stanovuje pomocí Haindlova empirického vztahu, do něhož mimo jiné vstupuje i poloměr náhradní kružnice r popsany v kapitole 3.3.3.

$$m = 0,461 \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{0,033} \quad (4.8)$$

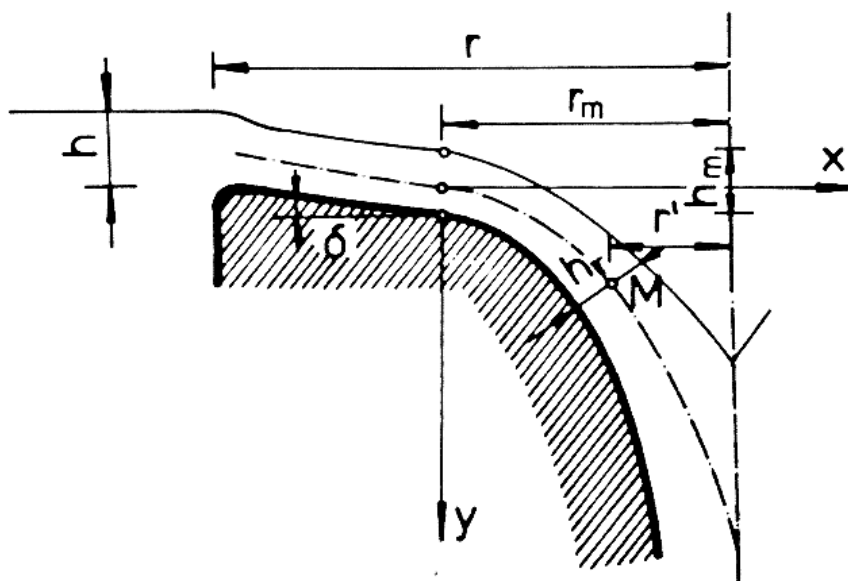
Symbol	Popis	Jednotka
m	součinitel přepadu	
h	přepadová výška	m
r	poloměr náhradní kružnice	m

b) Proudnicová plocha podle Wagnera

Souřadnice této plochy a také součinitel přepadu m se určují na rozdíl od Haindlovy plochy tabulkami.

4.3.3 Šachtový přeliv s prahem (podle Achutina)

Je tvořen prahem o určené délce a sklonu. Proudnicová plocha je inspirována kvadratickou parabolou. Achutin sepsal doporučení k rozměrům prahů. Při jejich dodržení je součinitel přepadu $m = 0,35$ až $0,38$ (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 136).



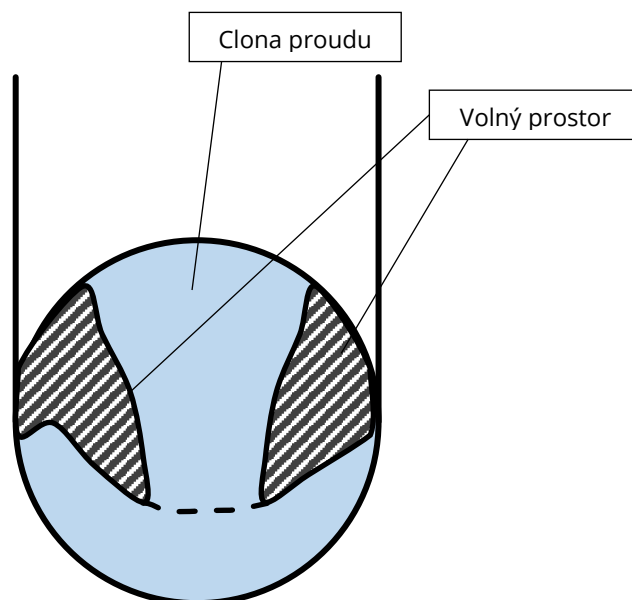
Obr. 16 – Šachtový přeliv s prahem (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 135)

5 STÁDIA PROUDĚNÍ

Proudění svislou částí (šachtou), následného konfuzorového kolena a začátku vodorovné části (štoly) je u šachtových přelivů hůře definovatelné. Na základě provedených výzkumů se však dá proudění rozdělit do mnoha stádií. Počet stádií je různý u více autorů. Například při modelových zkouškách na „polovičním“ modelu bylo pracováno s 12 stádii (Kybast, 1987, s. 445). Polovičním modelem je myšlena úprava, kdy celý model neměl kruhový průřez, ale jen půlkruhový s průhlednou stěnou (byl rozříznut vertikální rovinou). Takto upravená konstrukce umožnila sledování jevů v každém profilu modelu.

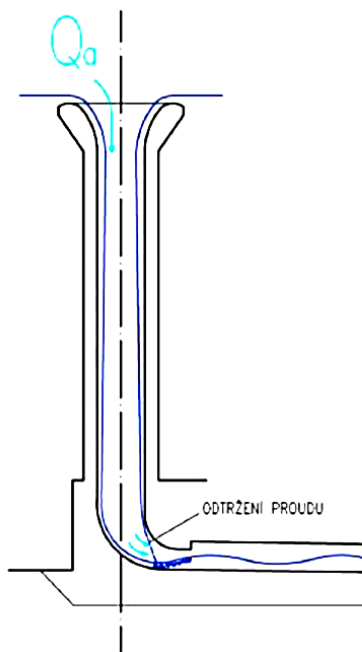
5.1 Stádium 1

První stádium je zcela beztlakové, rotačně symetrické a jedná se o dokonalé proudění. Voda je přilepená ke stěně šachty po celé délce, uprostřed je vzduchový komín. Odlehlost povrchu (hladiny) vody v šachtě od stěny se s klesající hloubkou zmenšuje vlivem narůstající rychlosti. Největší odlehlost je tak hned u nálevky. U kolena se voda na konvexní straně odlepuje od stěny a vytváří clonu. Kolem ní je potom volný prostor, kterým proudí vzduch mezi šachtou a štolou (Kybast, 1987, s. 445; Šulc, 2020, s. 18).



Obr. 17 – Clona proudu na konvexní straně

V kolenní voda nedosahuje stropu, což je viditelné i z Obr. 17, kde jsou vyznačeny oblasti s volným prostorem vyplněným vzduchem. Při narážení proudu tvořícího clonu do proudu z konkávy dochází k jejich silnému provzdušnění.



Obr. 18 – Stádium 1 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 18)

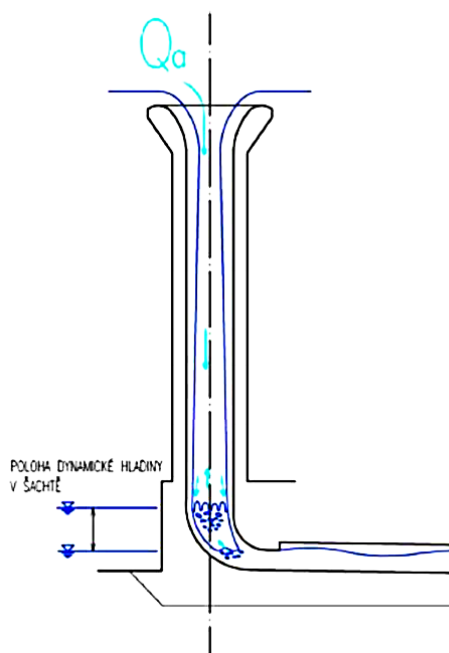
5.2 Přechod mezi stádii 1 a 2

Oblast přechodu je typická nestabilním jevem. Občas je proudění velice podobné s prouděním ve stádiu 1 a občas naopak dojde už k zahlcení na konci konfuzorového kolene a dojde k tlakovému proudění. V tomto případě může dojít na konvexe, v prostoru, kde se odtrhává paprsek, ke vzniku podtlakového pásma.

Nestabilita je způsobena změnou hydraulického poloměru před a po zahlcení protékaného profilu a také dynamickým účinkem padající vody (Kybast, 1987, s. 447).

5.3 Stádium 2

Již se jedná o stabilní tlakové proudění, výtok z kolene je zahlcený a vzduchový komín je dole uzavřený sloupцем vody. Ve sloupci vody je proud zpomalený, a tak dochází k vyvzdušňování. Bublinky vzduchu unikají pomalu směrem k hladině do vzduchového komína. Přívod vzduchu do odpadní štoly bývá realizován zavzdušňovacím potrubím ve stropě štoly (Kybast, 1987, s. 447; Šulc, 2020, s. 18).

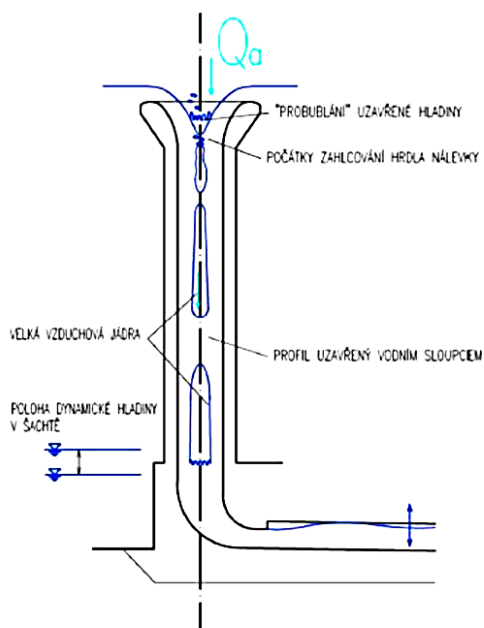


Obr. 19 – Stádium 2 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 18)

5.4 Stádium 3

Nadále pokračuje dokonalý přepad, výtok z kolene zůstává zahlcený. V tomto stádiu je viditelná korelace mezi rychlostí proudění a směrem úniku bublinek vzduchu. Při nižších rychlostech uniká vzduch vzhůru šachtou obdobně jako ve stádiu 2. Při vyšších rychlostech proudění však vzduch mění směr a vytéká společně s vodou odpadní štolou. S rostoucím průtokem plynule roste i výška vodního sloupce ve svislé šachtě. V případě vyvzdušňování velkých jader potom dochází k výstřikům několik metrů do výšky, což s sebou nese i tlakové pulzace, které jsou pro tuto oblast proudění velice typické, a proto je i tato oblast brána jako mezní hodnota pro návrhové průtoky šachtových přelivů (Kybast, 1987, s. 447).

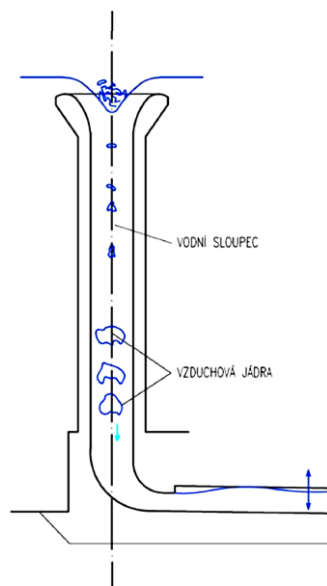
V tomto stádiu ovšem stále nedochází k trvalému ovlivnění přepadu (Šulc, 2020, s. 18).



Obr. 20 – Stádium 3 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 18)

5.5 Přechod mezi stádii 3 a 4

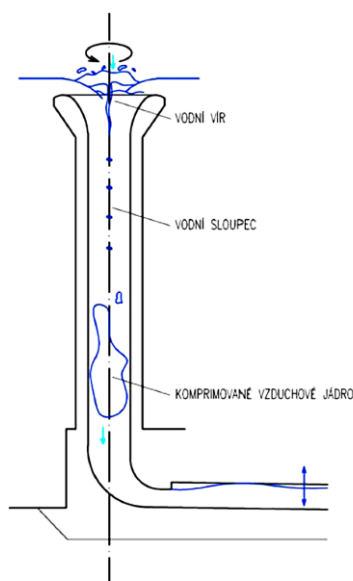
Nyní již začíná zahlcování nálevky, už se jedná o nedokonalý přepad. Zahlcování hrdla je nepravidelné. Výška sloupce vody rychle roste a rychle a pravidelně strhává vzduchová jádra. Ta unikají zpět do atmosféry doprovázené hlasitým zvukovým efektem. Vzduchová jádra při svém pohybu způsobují tlakové pulzace. Když se dynamická hladina dostane až k nálevce a nad korunu, tak se tvoří hladinový nálevkovitý vír.



Obr. 21 – Přechod mezi stádii 3 a 4 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 19)

5.6 Stádium 4

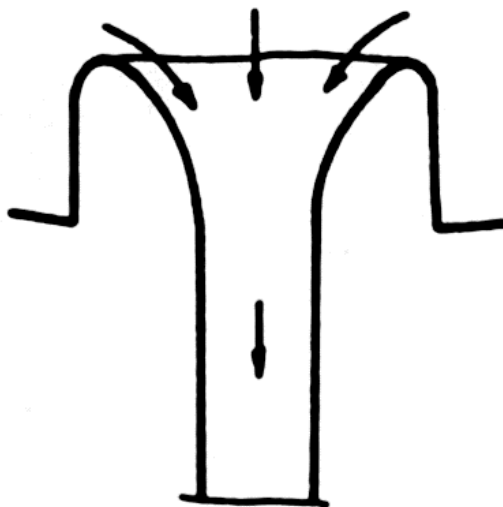
Nedokonalý přepad s hladinovým nálevkovitým vírem. Již přichází analogie s výtokem otvorem. Komprimovaná vzduchová jádra unikají do atmosféry skrz sloupec vody doprovázeny zvukovým efektem a silnou tlakovou pulzací. Vzduch může unikat i po proudu. I tento směr pohybu vzduchu je doprovázen silným zvukovým efektem.



Obr. 22 – Stádium 4 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 19)

5.7 Stádium 5

Toto je poslední stádium, kdy se jedná o totální zahlcení. V šachtě jsou vyrovnané tlakové poměry, hladina je nad korunou téměř shodná s hladinou v nádrži.



Obr. 23 – Stádium 5 proudění šachtovým přelivem (Kybast, 1987, s. 449)

5.8 Obecně ke stádiím proudění

Rázové jevy způsobené tvořením vzduchových jader v šachtě vznikají při přechodu mezi 3. a 4. stádiem a projevují se dále ve 4. stádiu. Podle pozorování jsou rázové jevy důsledkem vzduchových jader vytvořených při zahlcení nálevce a při sloupci vody v šachtě pod zahlcením hrdla. Jevy se liší podle úrovně dynamické hladiny vzhledem k výtoku do odpadní štolý v momentu, kdy nastává zahlcení (Kybast, 1987, s. 457).

V případě, že je již výtok z šachty zahlcený, tak zhruba třetina vzduchu z provzdušněného přepadového paprsku pokračuje poproudě do štolý, zbylý vzduch se protiproudě vrací skrz dynamickou hladinu a přes vzduchový komín až do atmosféry. Když dojde k zahlcení hrdla, tak už vzduch nemůže unikat protiproudě a začne se hromadit a vytvoří se jádro mezi zahlceným hrdlem a dynamickou hladinou. Postupně roste tlak působící na jádro až dojde k rázovému pohybu šachtou proti proudu. Jádro se dostane do atmosféry, hladina v nádrži se rozvlní a vše je doprovázeno zvukovým efektem (Kybast, 1987, s. 458–459).

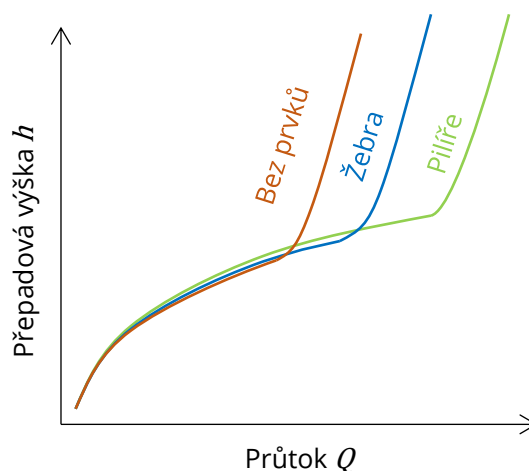
Pokud je výtokový otvor z šachty nezahlcený, vzduchový komín je na začátku jevu bez dolního uzavření. Vzduch tak může proudit všemi směry. Padající proud strhává vzduch z šachty a částečně jej pohlcuje. Když dojde k zahlcení nálevky, dotace vzduchem z atmosféry je přerušena. V šachtě začíná docházet k poklesu tlaku vzduchu, což způsobí zpomalení proudu vody v dolní části šachty. Pomaleji proudící voda začne zahlcovat výtokový otvor a vytvoří tak uzavřené vzduchové jádro. U nálevky postupně začne vznikat vír, který do šachty stahuje vzduch a tím vznikne další menší jádro, které je od prvního odděleno malým sloupcem vody. Jádra postupně pokračují směrem k výtoku. Když se k němu dostanou, výtokový otvor se částečně otevře a jádro pokračuje poproudě. Tento jev strhávání vzduchu, vytváření menších jader a jejich poproudění vypouštění, se děje opakovaně (Kybast, 1987, s. 459–462).

Již v úvodu této kapitoly bylo zmíněno, že stádií je možno rozlišit větší množství. Při modelovém výzkumu na „polovičním“ modelu bylo pozorováno stádií 12, ovšem je dodáno, že celý tento soubor se vyskytuje pouze v případě regulovatelného uzávěru výtoku z šachty (Kybast, 1987, s. 451).

Dalším rizikem, které přináší rázové jevy je vznik tlakových oscilací, které vznikají při pulzacích s dominantní frekvencí. Oscilační namáhání je schopno poničit stavbu hráze i šachtového přelivu. U betonových prvků se jedná zejména o spáry, u sypané hráze potom o riziko vzniku vnitřní eroze podél procházející štoly (Brouček et al., 2018)

6 USMĚŘŇOVACÍ PRVKY

Obecně se jedná o prvky umísťované na nálevku šachtového přelivu. Existuje více druhů prvků a liší se i jejich funkce.



Obr. 24 – Q/h křivka s různými úpravami nálevky

6.1 Usměřňovací pilíře

Jak bylo již zmíněno v kapitole Nedokonalý přepad přes šachtový přeliv a kapitole Šachtový přeliv klasického typu, při zvyšující se hladině a zatápní vtoku dochází ke vzniku vírů, které snižují kapacitu. Pro jejich eliminaci se navrhuje pilíře.

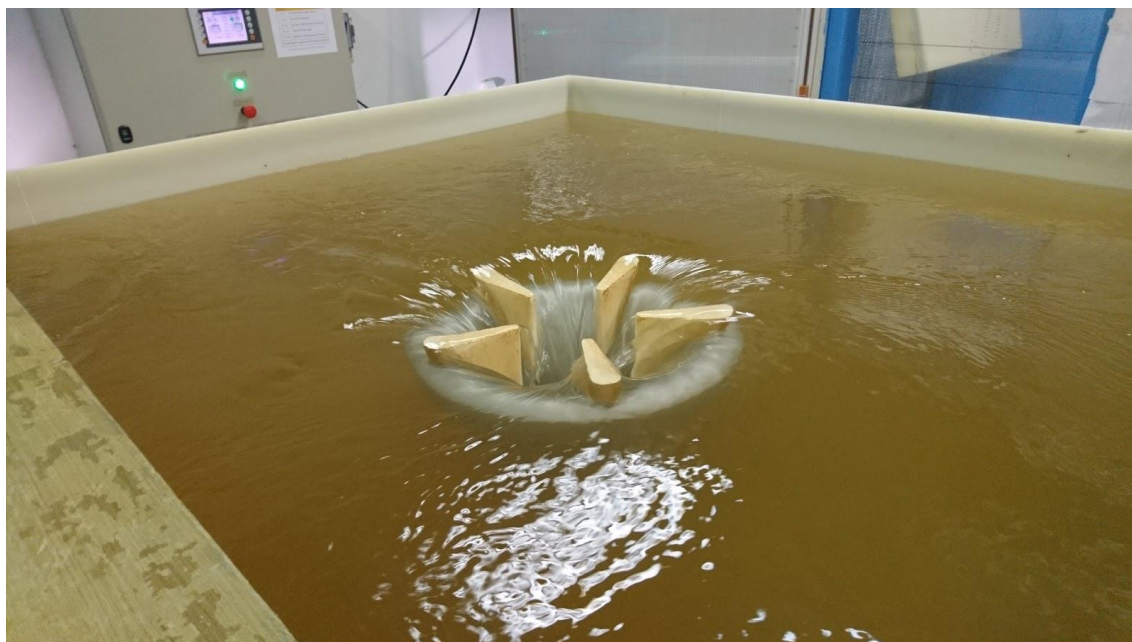


Foto. 2 – Model VD Pod Bukovcom – vliv pilířů na vznik vírů

6.1.1 Výhody pilířů

Existence pilířů na šachtovém přelivu zvyšuje hydraulickou kapacitu **při nedokonalém přepadu**. Pilíře rozdělují přepadající vodu, omezují rotaci hladiny, a tak nedochází ke vzniku hladinových

vířů. Příchod zahlcení a platnost závislosti výtoku otvorem se „posouvá dál“. Posunutí zlomu u Q/h charakteristiky je vyobrazeno na Obr. 24.

Díky pilířům může u některých tvarů nálevek docházet k provzdušnění přepadového paprsku, čímž se sníží riziko nežádoucích podtlaků na spodní straně paprsku a obtékaném povrchu nálevky.

Pilíře mohou mít také ochrannou funkci, kdy zabráňují vniku velkých plovoucích předmětů, kmenů stromů do šachty (Šulc, 2020, s. 67).

6.1.2 Nevýhody pilířů

Přidané pilíře snižují účinnou přepadovou délku (obvod), a tak při nižších průtocích kapacitu přelivu snižují.

Podle některých pokusů se při instalaci usměrňovacích prvků zvyšují potíže se strháváním vzduchu a opačným prouděním vzduchu vertikální šachtou (Brouček et al., 2018).

6.2 Usměrňovací žebra

Tento usměrňovací prvek funguje opačně než usměrňovací pilíře. Žebra podporují vznik vířů, čímž eliminují vznik těch nežádoucích. Jedná se o tzv. „pražský typ“ šachtového přelivu. V nálevce se vytvoří spirální proudění a odstředivou silou se voda částečně přilepí na konstrukci (Broža et al., 1984).



Foto. 3 – Model VD Jirkov vtoková část s žebry (Brouček et al., 2018)

6.2.1 Výhody žebber

Při spirálním proudění voda proudí podél stěn a nedopadá tak přímo na koleno za šachtou, tudíž je koleno méně namáháno. Proud vody zároveň dokáže díky této úpravě lépe převést některé povodňové splaveniny (Čábelka, 1971).

Oproti šachtovému přelivu bez usměrňovacího prvku, kde se víry tvoří náhodně, je u přelivu s žebry vyšší kapacita při dokonalém přepadu. Opět dochází k posunu přechodu do výtoku otvorem později než v případě bez usměrňovacího prvku. Ovšem posun není tak výrazný jako v případě usměrňovacích pilířů viz Obr. 24.

Transformace proudění ze spirálního na axiální se promítá i do síly tlakových pulzací. Při stabilním spirálním proudění jsou nižší tlakové pulzace než při axiálním proudění, které je vynucené usměrňovacími pilíři (Brouček et al., 2018).

6.2.2 Nevýhody žeber

Kapacita při dokonalém přepadu není až tak vysoká jako je u usměrňovacích pilířů. Žebra navíc v porovnání s pilíři omezují profil i v části pod vírem, kde může být zmenšení průtočného profilu citelnější.

6.3 Počet a tvar usměrňovacích prvků

Dostatečně podrobná analýza, který by přinesla odpověď na otázku nejvhodnějšího počtu a tvaru pro libovolnou nádrž zatím nevznikla a pravděpodobně ani nevznikne. U každé přehrady je rozdílná morfologie terénu, která se do obecného řešení dá jen těžko promítnout. Proto jsou počty a tvary usměrňovacích prvků řešeny u každého návrhu individuálně (Brouček et al., 2018).

Faktem však je, že u většiny měření vychází lépe hodnoty při použití více než 4 pilířů. Například při testování jehlanovitých pilířů (Sayadzadeh et al., 2020) vycházely nejvyšší kapacity pro modely s šesti pilíři v porovnání s třemi anebo čtyřmi pilíři. Je vhodné k tomuto výzkumu doplnit, že samotný testovaný tvar pilířů je neobvyklý, neboť se jednalo o jehlany.



Foto. 4 – Přeliv Kechut Arménie (Kechut Reservoir, 2019)

Na Foto. 4 je vyfocen bezpečnostní přeliv na nádrži Kechut v Arménii. Neobvyklé řešení nálevky jednak láká turisty, jednak má své výhody z hlediska hydrauliky. Ačkoli tento přeliv neobsahuje pilíře, tak díky jeho půdorysnému tvaru nevznikají víry a je tak posunut příchod zahlcení. Přelivná hrana je navíc poměrně dlouhá (má větší obvod), takže se zvyšuje kapacita. Stavebně se však jedná o velmi komplikované řešení.

7 PODMÍNKY BEZPEČNÉHO PROVOZU ŠACHTOVÝCH PŘELIVŮ

Na šachtových přelivech musí být prováděn technickobezpečnostní dohled (TBD). Tato podmínka je ustanovena v §61 odst. 3 b) zákona 254/2001 (vodní zákon). Ministerstvo zemědělství udržuje aktualizovaný seznam osob pověřených k provádění technickobezpečnostního dohledu nad vodními díly. Podle vodního zákona totiž TBD u vodních děl I. až III. kategorie může dohled provádět pouze pověřená osoba. Stejná právní norma rovněž ukládá povinnost sledovat průběh jevů, jako jsou převádění povodní, tvorba nápečů a zácp, v rámci ochrany před povodněmi (Zákon č. 254/2001).

Výše zmíněné kategorie vodních děl jsou popsány v §4 odst. 4 vyhlášky 471/2001 (Vyhláška ministerstva zemědělství) a v příloze č. 1 k vyhlášce. Návrh zařazení díla do kategorie probíhá podle vyčíslení potenciálu škod, jež provádí pověřená osoba ze seznamu Ministerstva zemědělství (Vyhláška č. 471/2001).

Kromě kategorií se vodní díla dělí také do skupin. Ty slouží k tabulkovému určení míry bezpečnosti podle doby opakování povodně.

Tab. 11 – Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni (Vyhláška č. 590/2002)

Skupina vodních děl	Označení výše škody	Kategorie vodního díla	Hodnotící hlediska	Požadovaná míra bezpečnosti vodního díla	
				P=1/N	N
A	Velmi vysoké	I. - II.	Očekávají se značné ztráty na lidských životech	0,0001	10 000
		II.	Ztráty na lidských životech jsou nepravděpodobné	0,0005	2 000
B	Vysoké	III. - IV.	Očekávají se ztráty na jednotlivých lidských životech	0,001	1000
			Ztráty na lidských životech jsou nepravděpodobné	0,005	200
C	Nízké	IV.	Škody pod vodním dílem a ztráty z užitku	0,01	100
			Ztráty jsou jen u vlastníka, ostatní škody jsou nevýznamné	0,02 až 0,05	50 až 20

Vysvětlivka: N – doba opakování povodně vyjádřená v letech (Vyhláška č. 590/2002).

Při zakládání přehrad je zakázáno používání pilot. A to jak pro tělesa hrází, tak i pro objekty umístěné v podloží hráze. Tato zásada platí právě pro horizontální část šachtového přelivu (odpadní štolu), která prochází tělesem hráze (ČSN 75 2410, 2011; ČSN 75 2340, 2017).

Účelové objekty na vodních díle často vytvářejí při jejich protékání pulzace. Na to je při návrhu potřeba myslet a dbát na zamezení jejich přenášení do tělesa hráze a k těsnicímu prvku. Právě proto, se navrhuje objekt s tímto typem přelivu vždy předsunutý před těsnící prvek hráze směrem do nádrže (ČSN 75 2340, 2017).

Kapacita bezpečnostního přelivu daného díla má být alespoň shodná s kapacitou přelivu všech jednotlivých děl ležících nad tímto dílem na stejném toce. Tato podmínka se vyžaduje za předpokladu stejné kategorie vodních děl. U přelivů nesmí hrozit snížení kapacity z důvodu ucpání, protože by vedlo ke zvýšení hladiny nad předpokládanou úroveň. Proto se nesmí na přelivech ani blízko u nich umísťovat česle anebo jiná zařízení, která by k takovému snížení kapacity mohla vést (ČSN 75 2340, 2017).

Komplikace s ucpáním česlí na přelivu nastala například na VD Labská.



Foto. 5 – Ucpávání česlí na bezpečnostním přelivu (VD Labská, 2017)



Foto. 6 – VD Labská po úpravách proti ucpávání (SMP CZ, a.s., 2019)

Kromě ucpávání například stromy a větvemi, jak bylo viditelné na Foto. 5, hrozí u šachtových přelivů také ucpávání ledovými krami. Ledové celiny obecně na přehradě působí také svým tlakem, na což se u návrhu šachtových přelivů musí dbát. Kromě zimního režimu a plovoucích předmětů se použití šachtového přelivu musí obhájit i z dalších hledisek: spolehlivost hydrologických podkladů, způsob dozoru a obsluhy vodního díla, dynamické jevy a chvění konstrukce (ČSN 75 2340, 2017).

Průměr vertikální části šachtového přelivu musí být nejméně 3 m (ČSN 75 2340, 2017).

Uspořádání odpadu (horizontální štolý) ani navazujících částí by nemělo ovlivňovat kapacitu přelivu. Pokud se tak stane, je nutné tuto skutečnost zohlednit ve výpočtech (ČSN 75 2340, 2017).

U šachtového přelivu hrozí při překročení návrhového průtoku zahlcení. Proto musí být navržen tak, aby nedošlo k zahlcení dříve, než hladina dosáhne úrovně koruny, anebo tak, aby byla kapacita rovna dvojnásobku průtoku při maximální hladině (Říha, 2006, s. 136).

Pro šachtové přelivy se štolou s kapacitou do $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ není nutný modelový výzkum, ovšem je nutné zhodnocení vzniku a dopadu příčných vln v odpadní štolě v případě proudění o volné hladině (Šulc, 2020, s. 21).

7.1 Štolý

Štolý mohou být navrženy s prouděním o volné hladině, ale i s tlakovým prouděním. Obecně se dbá na eliminaci průsaků a přenosu pulzací a dynamických účinků.

Dimenze horizontální štolý je dána dvojnásobkem návrhového průtoku $2 \cdot Q_n$ s převýšením 0,6 m nad maximální hladinou. Tato zásada byla používána pro sdružené objekty u zemních hrází do výšky 15 m (Šulc, 2020, s. 21).

7.1.1 Štoly o volné hladině

U štol o volné hladině je potřeba zavzdušnění při všech průtocích (ČSN 75 2340, 2017). V případě štol za kolény šachtových přelivů se zavzdušnění provádí například potrubím ve stropě štoly hned za konfuzorovým kolenem.

Dno štoly má být nad prahem vývaru s dostatečnou rezervou, aby nedocházelo k ovlivňování proudění zpětným vzdutím od vývaru (ČSN 75 2340, 2017).

a) V tělese hráze

Jedná se o upřednostňovanou variantu před variantou tlakovou. I zde však musíme zajistit nepropustnost vody ze štoly a do štoly. Především u sypaných hrází by totiž mohlo dojít ke kolapsu.

b) Ražené do skály

Tyto štoly se opatřují obezdívkou podle požadavků na drsnost a stavu horniny. Je možné provést obezdívku pouze v omočené části profilu.

7.1.2 Štoly tlakové

Podle prostředí, kterým štola prochází se velice liší podmínky pro tlakové štoly. Dělení podle okolí štoly je stejné, jako u štol o volné hladině.

a) V tělese hráze

Při prostupu tělesem hráze se mají eliminovat průsaky. Právě proto se snažíme štolám s tlakovým prouděním v tělese hráze vyhnout. Mimo to tlakové proudění je doprovázeno většími pulzacemi, které by se mohly převádět do tělesa, což je nežádoucí.

Z výše zmíněných důvodů se tato problematika řeší pomocí ocelových potrubí uložených volně ve štole v případě sypaných hrází, anebo rovnou zabetonovány v případě betonových či zděných hrází.

Navrhování tlakového ocelového nebo železobetonového (betonované na místě) potrubí přímo do tělesa sypané hráze lze pouze ojediněle za splnění podmínek: obetonované ocelové potrubí, železobetonová štola v celé délce opacerovaná, existence kontrolního systému na těsnosti a deformace, omezení rázových účinků, možnost oprav těsnění (ČSN 75 2340, 2017).

b) Ražené do skály

Stejně jako při proudění o volné hladině i zde je vyžadována obezdívka. Ovšem potřebná je po celém obvodu a k zajištění přilnavosti se zainjektovává. Zvýšenou pozornost si zaslouží oblast přechodu z tlakové štoly do tlakového potrubí (ČSN 75 2340, 2017).

7.2 Obecné doporučení

Dosud nové jevy je vždy nutné sledovat modelově. Nejen z důvodu různého tvaru nádrže, jak je popsáno v úvodu kapitoly 6.3, ale také z důvodů složité problematiky proudění šachtovým přelivem, které je bez modelu těžce předpověditelné.

8 MODELOVÁ PODOBNOST

Modelová podobnost je souhrn pravidel, jimiž se řídí navrhování a sestavování modelů. Modely jsou potřebné pro testování nových jevů, pro ověření výpočtů a dále.

Zákonů modelové podobnosti je více. Například Reynoldsův zákon, pro modelování proudění okolo těles ponořených do kapaliny, kde hraje zásadní roli působení sil vnitřního tření, anebo Froudův zákon modelové podobnosti vyjadřující podmínky dynamické podobnosti za výhradního působení sil gravitačních (Čábelka a Gabriel, 1987, s. 49).

Model použitý pro měření k této bakalářské práci byl vymodelován podle Froudova zákona podobnosti. Majoritní silou je síla gravitační a minoritními jsou síly třecí vazkých kapalin, kapilární, objemové pružnosti a další. Proto je toto kritérium vhodné pro simulaci proudění o volné hladině. Kinematicky podobné jevy, ovlivňované především gravitační silou, si mohou být podobné i dynamicky v případě, že ve vzájemně příslušných průřezích budou stejně velká Froudova čísla (Čábelka a Gabriel, 1987, s. 50).

V případě této práce se jedná o model zmenšený měřítkem $M_l = 14,06$ oproti skutečnému VD Pod Bukovcom. Hodnota měřítka je objasněna v kapitole 9. Podle Froudova kritéria a určeného měřítka délek pak vyplývají následující měřítka a přepočty pro daný model a danou problematiku:

- Měřítka rychlostí $M_v = (M_l)^{0,5} = 3,75$
- Měřítka průtoků $M_Q = (M_l)^{2,5} = 741,25$
- Přepočet modelové drsnosti $n_m = \frac{n}{M_l^{0,1666}} = \frac{0,014 \text{ až } 0,016}{14,06^{0,1666}} = 0,009 \text{ až } 0,010$

Pro modelování podle Froudova kritéria existují pro sledovanou problematiku dolní limitní hodnoty, které je nutno respektovat.

Přepadová výška na modelu

Přepadová výška na modelu má být vždy $h_{m \min} \geq 20 \text{ mm}$ (Šafář a Šulc, 2012).

Tato hodnota byla při měřítku $M_l = 14,06$ splněna v požadovaném rozsahu, spodní mez průtoků pro její dodržení je $Q_{dilo \min} = 5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při nižších průtocích se začíná více projevovat ovlivnění povrchovým napětím.

Povrchová rychlost proudu na modelu

Kapilární síly mohou bránit tvorbě povrchových vln, proto se vyžaduje minimální povrchová rychlost na modelu $u_m > 0,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Čábelka a Gabriel, 1987). Tato podmínka je splněna v celém rozsahu průtoků v celém objektu štol.

Podmínka automodelovosti přepadového jevu

Podmínka podle Averkijeva, která určuje minimální hodnotu Reynoldsova kritéria $Re_{m \min} = \frac{q}{\nu} > (3000 \text{ až } 5000)$, kde q je specifický průtok a ν je součinitel kinematické viskozity. S minimální průtokem je $Q_{dilo \min} = 5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, který odpovídá na modelu je $Q_{m \min} = 7,42 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, je hodnota Reynoldsova kritéria $Re_{m \min} = 5154$, což je hodnota vyhovující minimálním požadavkům (Šulc, 2020, s. 24).

Minimální délka strany výtoku otvoru

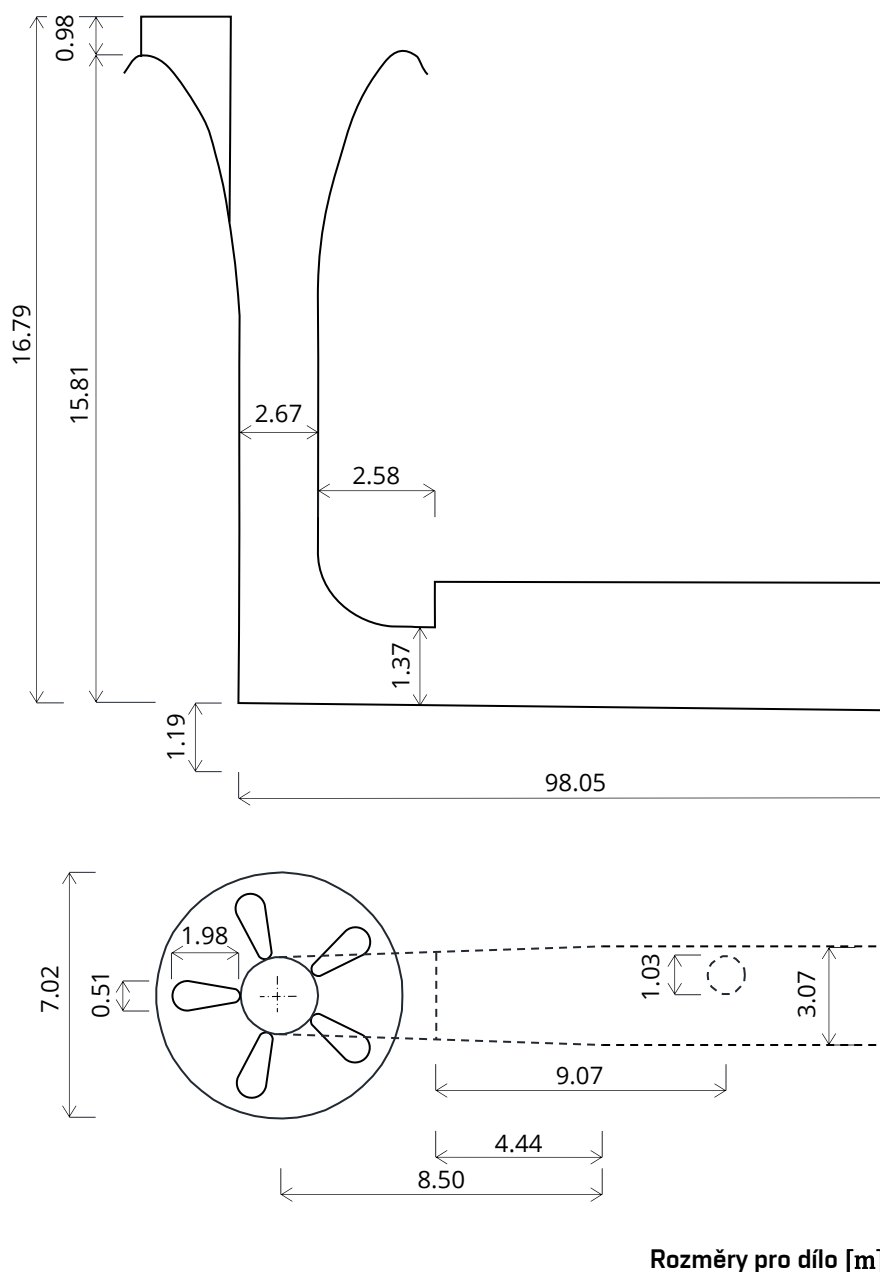
Aby bylo možné přepočítat proudový paprsek na dílo, musí být dostatečná tlačná výška, aby nebyl výtokový paprsek na tlačné výšce závislý. Z toho důvodu je jednak požadavek na minimální délku

strany výtoku otvoru $a_m > 60$ mm a jednak požadavek na odlehlost těžiště výtoku otvoru od hladiny $H_T \geq 3,3 \cdot a_m$.

Rozměr výtoku otvoru z kolene a modelu je $224 \text{ mm} \times 99,6 \text{ mm}$. Hodnota minimální délky strany otvoru a_m je tedy splněna. Při velikosti tlačné výšky $H_T = 1100$ mm, která nastává při zahlcení, je splněna i druhá podmínka.

9 MODEL

Praktická část práce probíhala na modelu instalovaném v prostoru hydraulické zkušebny v budově B Fakulty stavební VUT v Brně na ulici Veverí. Trojrozměrný hydraulický model má délkové měřítko podobnosti $M_l = 14,06$. Tato hodnota je určena vnitřním průměrem svislé šachty a potrubím z umaplexu, které bylo použito na modelu. Umaplexové potrubí se vyrábí v typizovaných rozměrech, i proto není měřítko délek M_l celé číslo.



Obr. 25 – Schéma VD Pod Bukovcom

Kóty Obr. 25 jsou v m a jedná se o rozměry díla. Rozměry modelu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 12 – Převod rozměrů VD a model

Dílo [m]	Model [mm]
1.37	97.45
98.05	6973.70
1.19	84.65
15.81	1124.50
16.79	1194.20
0.98	69.75
7.02	499.30
0.51	36.30
1.98	140.85
5.80	412.55
4.44	315.80
9.07	645.10
1.03	73.30
3.07	218.35
2.67	189.95
2.58	183.50

Pro model byly použity číré prvky, aby byla zajištěna viditelnost probíhajících jevů. Jedná se o potrubí šachty, stěny a strop počátečního úseku štoly a strop celé štoly. Strop z umaplexu je navíc demontovatelný kvůli zaměřování hladiny protékajícího proudu.

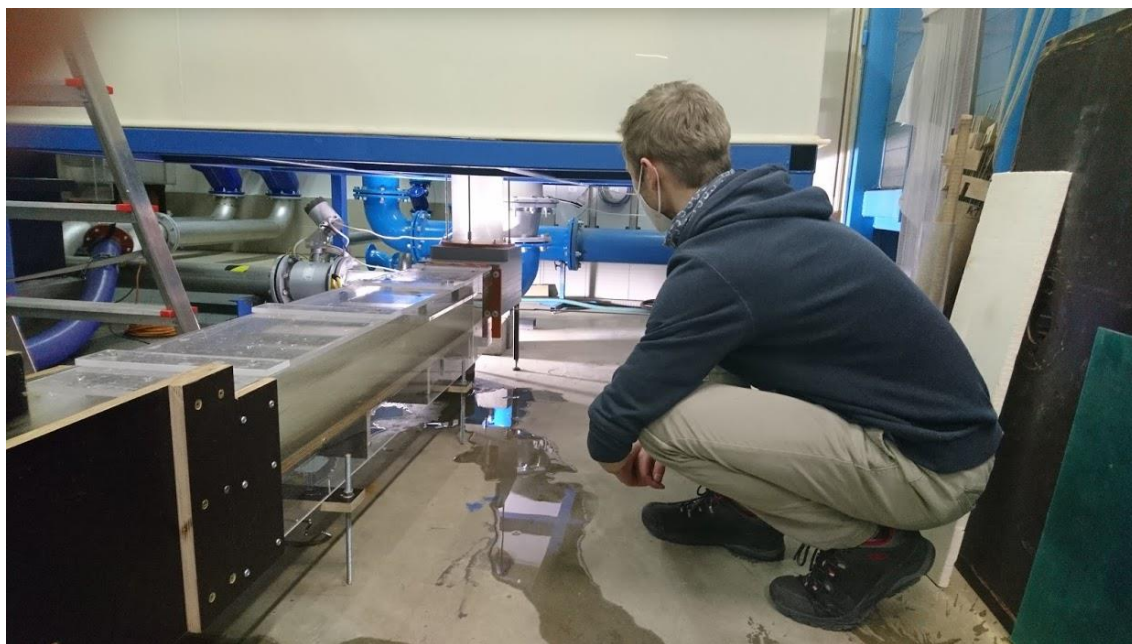
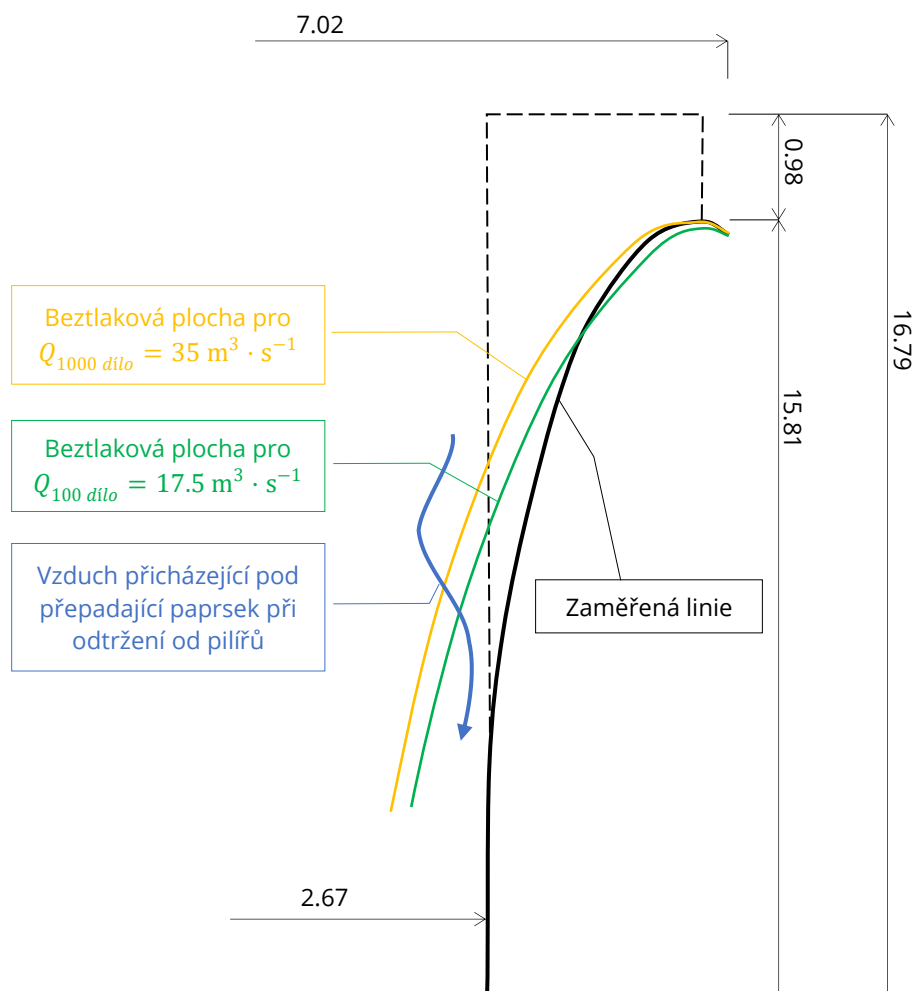


Foto. 7 – Pohled na šachtu, koleno a počáteční úsek modelu

Zbylé části štoly, (stěny za počátečním úsekem a dno v celé délce) byly vyrobeny z vodovzdorné překližky. Koleno a nálevka přelivu jsou ze slepených vodovzdorných překližek vytvarované soustružením, opracované broušením dle přesně zaměřených rozměrů a opatřené nátěrem na obtékaných površích. K šachtě na vodním díle je nutné dodat, že jeho průměr je 2,67 m, což je méně než požadavek ČSN 75 2340, která vyžaduje minimálně 3 m.



Obr. 26 – Podtlaková plocha díla VD Pod Bukovcom

Pilíře nalepované na nálevku jsou z tvrzeného polystyrénu. Homogenizaci přítokového proudu k nálevce bezpečnostního přelivu zajišťuje čtvercová nádrž o rozměrech 2 m × 2 m × 0,8 m a vertikálně zaústěný přítok se sítí.



Foto. 8 – Nálevka bez pilířů a zaústění vertikálního prítoku s homogenizačním sítím (Šulc, 2020, s. 26)



Foto. 9 – Nálevka s pilíři (Šulc, 2020, s. 26)



Foto. 10 – Protiproudňý pohled na řtolu s demontovaným stropem pro zaměření vodní hladiny

9.1 Hydraulický okruh

Hydraulický okruh modelu byl uzavřený, napájený čerpadly s motory s frekvenčními měniči. Přítokové potrubí viz Foto. 8 o průměru DN 150 je osazeno indukčním průtokoměrem. Z přítokového potrubí voda vytéká do nádrže, nad níž je umístěno UZV čidlo, jakožto součást řídicího systému okruhu. Rozlišovací schopnost čidla je 1 mm. Z nádrže umístěné 1,5 m nad podlahou přepadá voda dále do prvků modelu šachtového přelivu (šachta, koleno, řtola), řtola ústí do koncové nádrže na podlaze zkušebny. Voda z ní přepadá do propojeného podzemního zásobního prostoru se sací jímkou.

Rozsah průtoků hydraulického okruhu je $Q = (6 \text{ až } 120) \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, což je dokonce vyšší, než je potřeba pro provedení zkoušek. Hydraulický okruh byl řízen systémem laboratoře.

9.2 Měřicí technika

K měření úrovní hladin v odpadní řtole se používala hrotová měřidla. Právě k umožnění jejich využití byl strop řtoly demontovatelný.

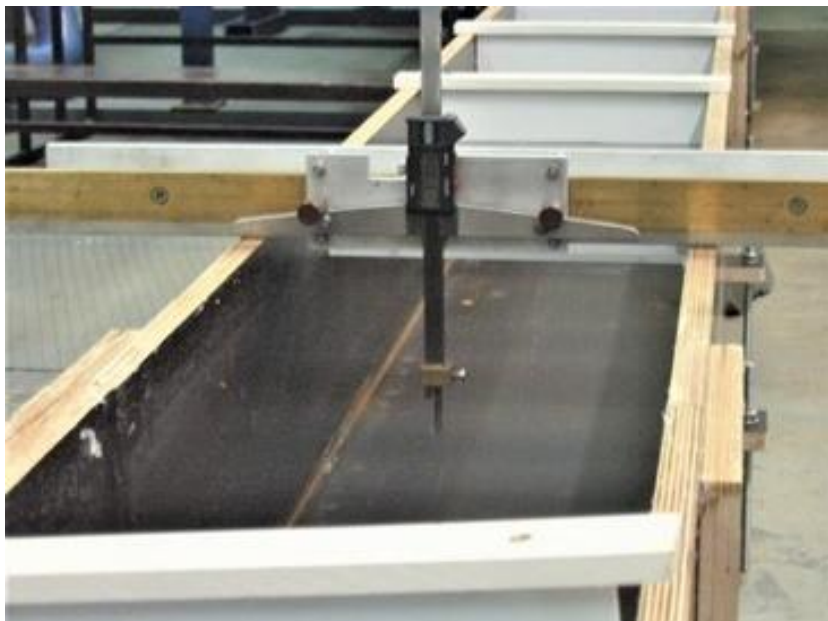


Foto. 11 – Digitální hrotové měřidlo na otevřené odpadní štolě (Šulc, 2020, s 28)

Úrovně hladin nad přelivem neboli výšky přepadového paprsku h byly snímány výše zmíněným UZV čidlem ELA PU 500. Vedle něj byla umístěna ocelová měrka.



Foto. 12 – UZV čidlo pro snímání polohy hladiny a ocelová měrka (Šulc, 2020, s 28)

Průtok byl měřen indukčním průtokoměrem ELA MQI 99 SN DN 150 instalovaným na přítokovém potrubí.



Foto. 13 – Indukční průtokoměr ELA na přítokovém potrubí

Hodnoty průtoků i přepadové výšky byly zároveň zobrazovány i na displeji PID regulátoru. V případě Foto. 14 se jedná o průtok Q_3 a výšku H_2 .



Foto. 14 – Hodnoty průtoku a přepadové výšky zobrazené na displeji

10 MĚŘENÍ NA HYDRAULICKÉM MODELU

Na modelu byly prováděny tři zkoušky, kdy při každé z nich byl model odlišný. Na první zkoušku byl model šachtového přelivu bez pilířů na nálevce. Druhá zkouška byla s pilíři nalepenými na nálevce. Třetí stav je s již nalepenými pilíři, a navíc se sníženým stropem za kolenem na počátečním úseku štol až po zavzdušňovací otvor.

10.1 Postup měření

Při dosažení stabilních poměrů byly zapisovány obě hodnoty přepadové výšky (hodnota z displeje i od UZV čidla) a obě hodnoty průtoků (hodnota z displeje i hodnota z indukčního průtokoměru). Ustálených poměrů bylo dosahováno PID regulátorem, který řídí frekvenční měniče čerpadel.

10.2 Bez pilířů

Jedná se o první sérii zkoušek. Model byl bez pilířů, což je stav odlišný od samotného vodního díla Pod Bukovcom. Výsledné hodnoty z měření jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 13 – Q/h hodnoty bez pilířů

Model		Dílo		Identifikace meze pro charakteristický jev
Průtok	Přepadová výška	Průtok	Přepadová výška	
Q_m [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	h_m [mm]	$Q_{dílo}$ [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	$h_{dílo}$ [m]	
5.29	16.20	3.92	0.23	
6.98	19.00	5.17	0.27	
8.45	21.50	6.26	0.30	
11.30	25.60	8.38	0.36	
13.50	28.80	10.01	0.40	
16.70	33.00	12.38	0.46	
20.10	36.10	14.90	0.51	
24.00	40.30	17.79	0.57	$Q_{100 \text{ dílo}} = 17.5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
26.50	43.20	19.64	0.61	
29.90	46.40	22.16	0.65	
32.30	48.70	23.94	0.68	
36.60	52.70	27.13	0.74	
40.50	56.00	30.02	0.79	
43.80	59.00	32.46	0.83	
47.50	61.90	35.21	0.87	$Q_{1000 \text{ dílo}} = 35 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
51.90	65.00	38.47	0.91	
55.70	69.00	41.28	0.97	
59.00	72.20	43.73	1.02	
65.00	76.00	48.18	1.07	Zahlcení počátku štol $Q_{dílo} = 44 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
68.30	79.00	50.62	1.11	
72.00	80.40	53.37	1.13	Hranice ovlivněnosti přepadu
75.20	132.00	55.74	1.86	
76.60	165.00	56.78	2.32	



Foto. 15 – Bez pilířů, dokonalý přepad $Q_{dlo}=14,03 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$



Foto. 16 – Bez pilířů, hranice ovlivněnosti $Q_{dlo} = 53,0 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

10.3 S pilíři

Série měření na modelu odpovídajícímu současné konstrukci šachtového přelivu na vodním díle Pod Bukovcom. Na nálevku jsou oproti předešlé variantě přilepené polystyrenové pilíře.

Tato varianta nejlépe ukáže současnou kapacitu VD a také při jakých průtocích se realizují která stadia proudění.

Tab. 14 – Q/h hodnoty s pilíři

Model		Dílo		Identifikace meze pro charakteristický jev
Průtok	Přepadová výška	Průtok	Přepadová výška	
Q_m [l·s ⁻¹]	h_m [mm]	$Q_{dílo}$ [m ³ ·s ⁻¹]	$h_{dílo}$ [m]	
6.28	19.20	4.65	0.27	
7.05	21.40	5.23	0.30	
8.36	23.40	6.20	0.33	Odtržení obtékajícího proudu od stěn šachty $Q_{dílo} = 5.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
10.20	26.60	7.56	0.37	
11.50	27.70	8.52	0.39	
12.70	29.80	9.41	0.42	
14.40	31.80	10.67	0.45	
16.10	35.00	11.93	0.49	
19.50	39.10	14.45	0.55	
22.50	43.00	16.68	0.60	
26.30	47.00	19.49	0.66	$Q_{100 \text{ dílo}} = 17.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
29.60	51.50	21.94	0.72	
34.00	54.60	25.20	0.77	
39.50	60.50	29.28	0.85	
42.80	63.50	31.72	0.89	
46.00	66.00	34.10	0.93	
48.70	69.00	36.10	0.97	$Q_{1000 \text{ dílo}} = 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
51.30	71.10	38.02	1.00	
55.60	74.00	41.21	1.04	
60.20	77.20	44.62	1.09	Zahlcení počátku štoly $Q_{dílo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
63.90	81.10	47.36	1.14	
67.10	84.00	49.73	1.18	
70.50	86.40	52.25	1.21	
73.00	88.40	54.11	1.24	Tlakový režim v celé štolě $Q_{dílo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
74.20	89.40	55.00	1.26	
75.60	90.50	56.03	1.27	
77.50	92.50	57.44	1.30	
79.20	93.50	58.70	1.31	
81.00	95.40	60.04	1.34	
82.10	96.40	60.85	1.36	
84.00	97.40	62.26	1.37	
85.60	99.40	63.45	1.40	
87.60	101.00	64.93	1.42	
89.20	102.30	66.12	1.44	
90.60	103.00	67.15	1.45	
92.20	105.20	68.34	1.48	
94.10	106.60	69.75	1.50	

Model		Dílo		Identifikace meze pro charakteristický jev
Průtok	Přepadová výška	Průtok	Přepadová výška	
$Q_m [\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$h_m [\text{mm}]$	$Q_{dilo} [\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	$h_{dilo} [\text{m}]$	
96.00	107.90	71.16	1.52	
97.20	109.80	72.04	1.54	
98.80	115.00	73.23	1.62	Zahlcení nálevky a výtok otvorem
100.00	141.00	74.12	1.98	
101.00	157.00	74.86	2.21	
103.00	172.00	76.34	2.42	

Při průtoku $Q_{dilo} = 5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se přepadající paprsek odtrhává od stěny šachty a středem tak protéká prakticky kompaktní proud viz Foto. 17 a

Foto. 18. Vlivem zúžení v konfuzorovém koleni vzniká protiproudění vzduší hladiny do úrovně otvoru.



Foto. 17 – Kompaktní proud uprostřed šachty při $Q_{dilo} = 5,3 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$



Foto. 18 – Kompaktní proud uprostřed šachty při $Q_{dilo} = 5,3 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Održení paprsku a tvorba kompaktního proudu v ose šachty pokračuje i s rostoucím průtokem až do $Q_{dilo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Zároveň se odtrhává občas proud od obtékaných povrchů na konci pilířů, tento jev se ovšem s rostoucím průtokem vyskytuje méně často, více viz odstavec nad Foto. 22.

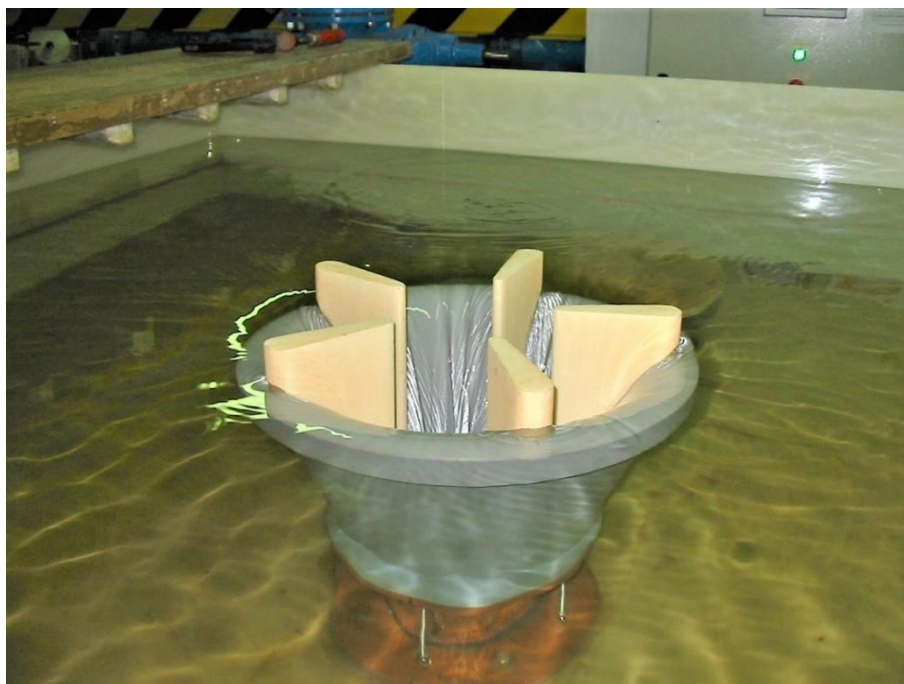


Foto. 19 – Dokonalý přepad přes šachtový přeliv při $Q_{dilo} = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Při průtoku $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se občas odtrhává kompaktní přepadající paprsek za pilíři a vytváří kapsy v úplavech, kterými proudí vzduch do prostoru mezi proudovým válcem vody a stěnou šachty. Stále dochází k odtrhávání od stěn šachty a tvorbě válce vody uprostřed šachty.



Foto. 20 – S pilíři při $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Šachta je při $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ od spodu vyplněna vodní tříští a zabírá celý profil. Vzduší pulzující hladiny je až do výšky 7,0 m nad otvor. Občas dojde k odtržení proudu vody od stěn šachty, když do ní vnikne vzduch z prostoru nálevky.



Foto. 21 – Vodní tříšť v šachtě při $Q_{1000\ dfl0} = 35,2\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Při průtoku $Q = 53,2\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se výjimečně, s velmi malou četností, na konci pilířů odtrhne proud a tím dojde ke vtažení vzduchu z atmosféry. Protiproudě je však tento vzduch opět vrácen do atmosféry, což je doprovázeno hlasitým zvukovým efektem. Stav při odtržení od plochy je zobrazen na Foto. 23.



Foto. 22 – Při $Q_{dfl0} = 53,2\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ bez odtržení proudu



Foto. 23 – Při $Q_{dfl0} = 53,2\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ s odtržením proudu

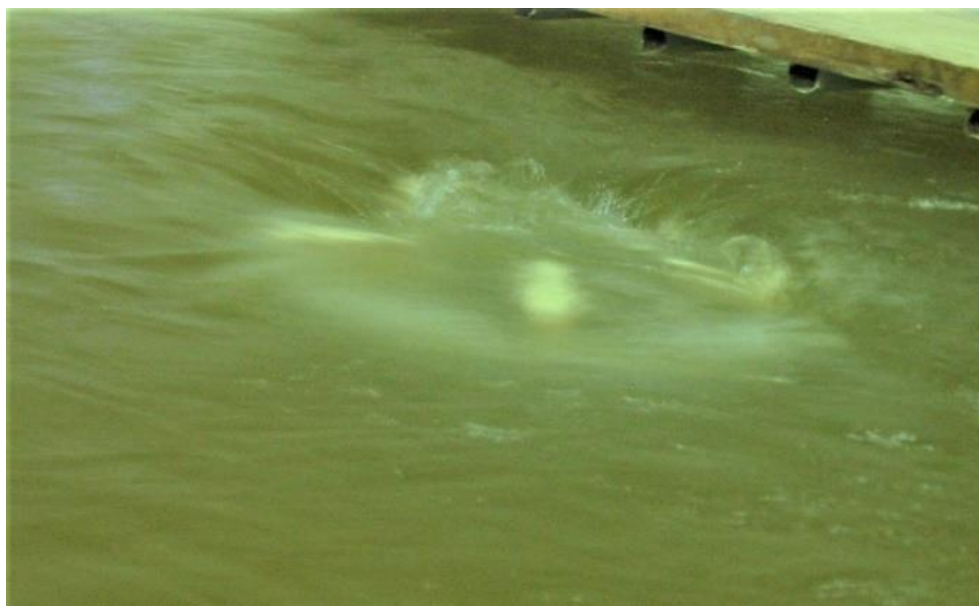


Foto. 24 – Trvalé zahlcení s pilíři, nedokonalý přepad při $Q_{dlo} = 77,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

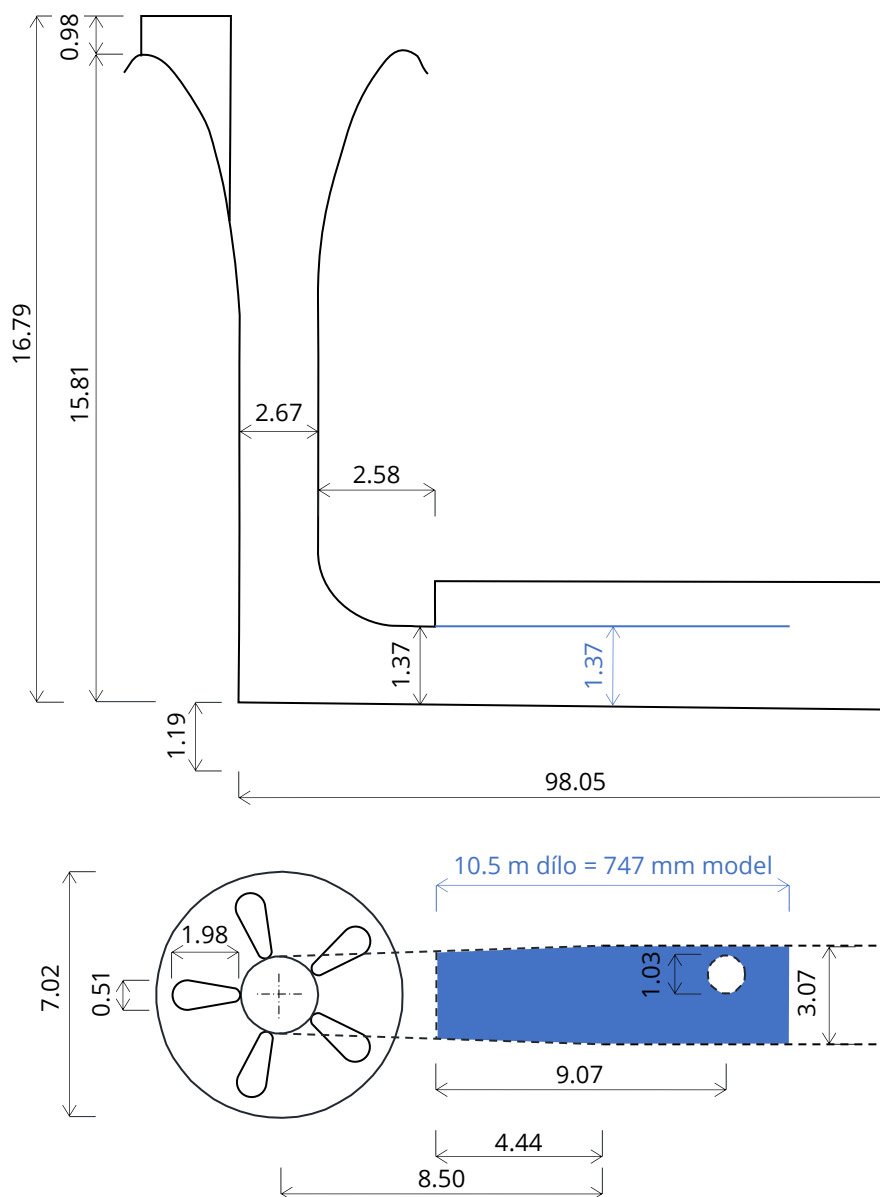
Přehled mezí, ve kterých se realizují různá stádia a popis daných stádií je pro tuto variantu vypsán v následující tabulce.

Tab. 15 – Přehled stádií pro variantu s pilíři bez úprav vstupní části štoly

Průtok na díle		Popis stádia
Od	Do	
Q_{dlo} [m ³ ·s ⁻¹]	Q_{dlo} [m ³ ·s ⁻¹]	
5.3	44.0	<p>Přepadající paprsek se odtrhává od stěny šachty a uprostřed šachty se vytváří kompaktní proudový válec.</p> <p>Protiproudě se vzdouvá pulzující hladina v kolenu.</p> <p>Odtržení obtékajícího proudu na konci pilířů. Skrz kapsy v úplavech za pilíři se dostává vzduch dál do šachty. Vtažený vzduch je vrácen do atmosféry. Tento jev nastává s rostoucím průtokem méně často.</p>
44.0	53.2	<p>Přepadající paprsek se již neodtrhává od stěny šachty.</p> <p>Občas, velice zřídka, dochází k odtržení obtékajícího proudu na konci pilířů. Vzduch proniknuvší skrz kapsy v úplavech se vrací zpětně do atmosféry za doprovodu hlasitého zvukového efekty.</p> <p>Počátek štoly je zahlcený, křížové vlny vystupují po bočních stěnách. Celý průřez je zahlcen z části kompaktním proudem a z části vodní tříští.</p>
53.2	77.1	<p>Celá štola je trvale zahlcena. Občas dojde k výstřiku ze zavzdušňovacího otvoru. Křížové vlny jsou v zahlceném prostoru potlačeny.</p> <p>Podesty pilířů jsou přetékány.</p>
74.0	77.1	Nálevka je zahlcena a již se jedná o výtok otvorem.

10.4 S pilíři a upraveným stropem

Tato varianta přidává na model konstrukci, jež není ani součástí VD Pod Bukovcom. Na počátečním úseku odpadní štol, hned za konfuzorem až po zavzdušňovací otvor ve stropě byl přidán snižující strop.



Rozměry pro dílo [m]

Obr. 27 – Schéma s přidaným stropem

Strop má zabránit vodě ve vystříknutí ze zavzdušňovacího otvoru a zároveň zvýšit sání vzduchu z atmosféry právě skrz otvor. Otvor je na VD Pod Bukovcom totiž neobvykle umístěn excentricky, což může snižovat jeho efektivitu.

Tab. 16 – Q/h hodnoty s přidáním stropem

Model		Dílo		Identifikace meze pro charakteristický jev
Průtok	Přepadová výška	Průtok	Přepadová výška	
Q_m [l·s ⁻¹]	h_m [mm]	$Q_{dílo}$ [m ³ ·s ⁻¹]	$h_{dílo}$ [m]	
4.98	18.65	3.69	0.26	
6.20	21.75	4.60	0.31	
7.04	22.75	5.21	0.32	
8.22	24.80	6.09	0.35	Održení obtékajícího proudu od stěn šachty $Q_{dílo} = 5.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
8.95	26.85	6.63	0.38	
9.45	26.85	7.00	0.38	
10.33	28.90	7.66	0.41	
14.06	34.00	10.42	0.48	
18.33	39.60	13.58	0.56	
22.33	43.90	16.55	0.62	
28.52	50.80	21.14	0.71	$Q_{100 \text{ dílo}} = 17.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
34.73	56.90	25.74	0.80	
40.47	62.90	30.00	0.88	
43.31	65.50	32.10	0.92	
47.58	69.75	35.27	0.98	$Q_{1000 \text{ dílo}} = 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
52.62	73.75	39.00	1.04	
57.07	77.60	42.30	1.09	
61.53	80.65	45.60	1.13	Zahlcení počátku štoly $Q_{dílo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
65.69	84.70	48.69	1.19	
69.92	88.25	51.82	1.24	
74.88	91.30	55.50	1.28	Hranice ovlivněnosti přepadu
79.55	95.25	58.96	1.34	
84.32	99.60	62.49	1.40	
89.40	103.30	66.26	1.45	
91.52	105.10	67.83	1.48	
94.09	108.55	69.74	1.53	

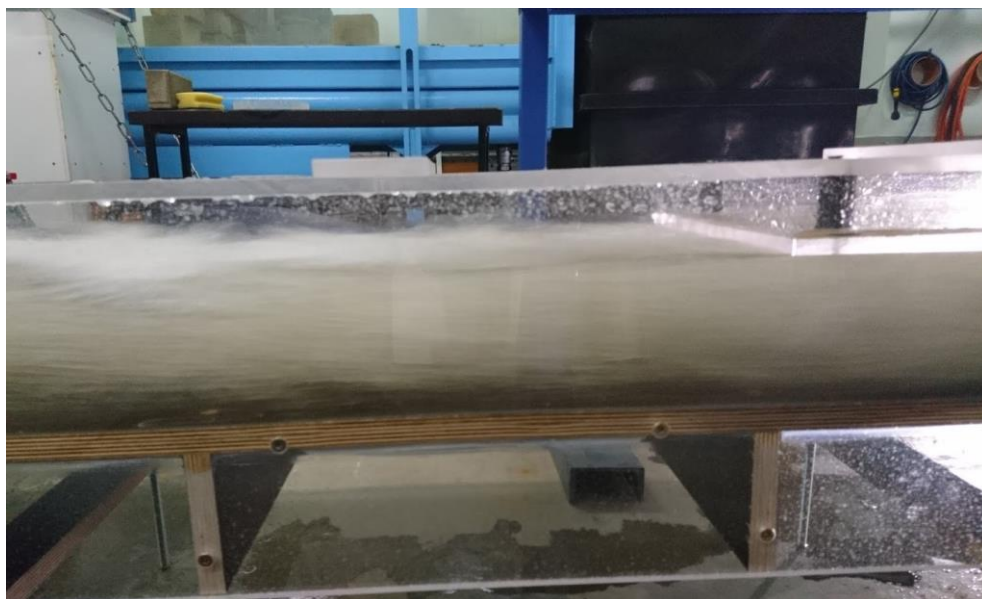


Foto. 25 – Výtok ze sníženého stropu při $Q_{dilo} = 25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

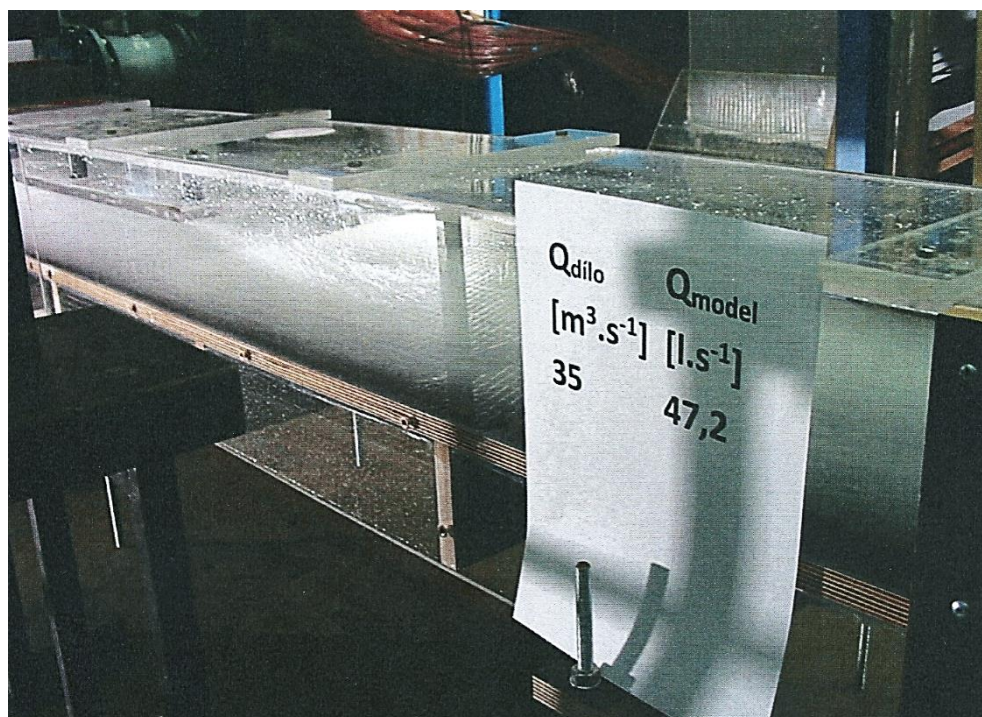
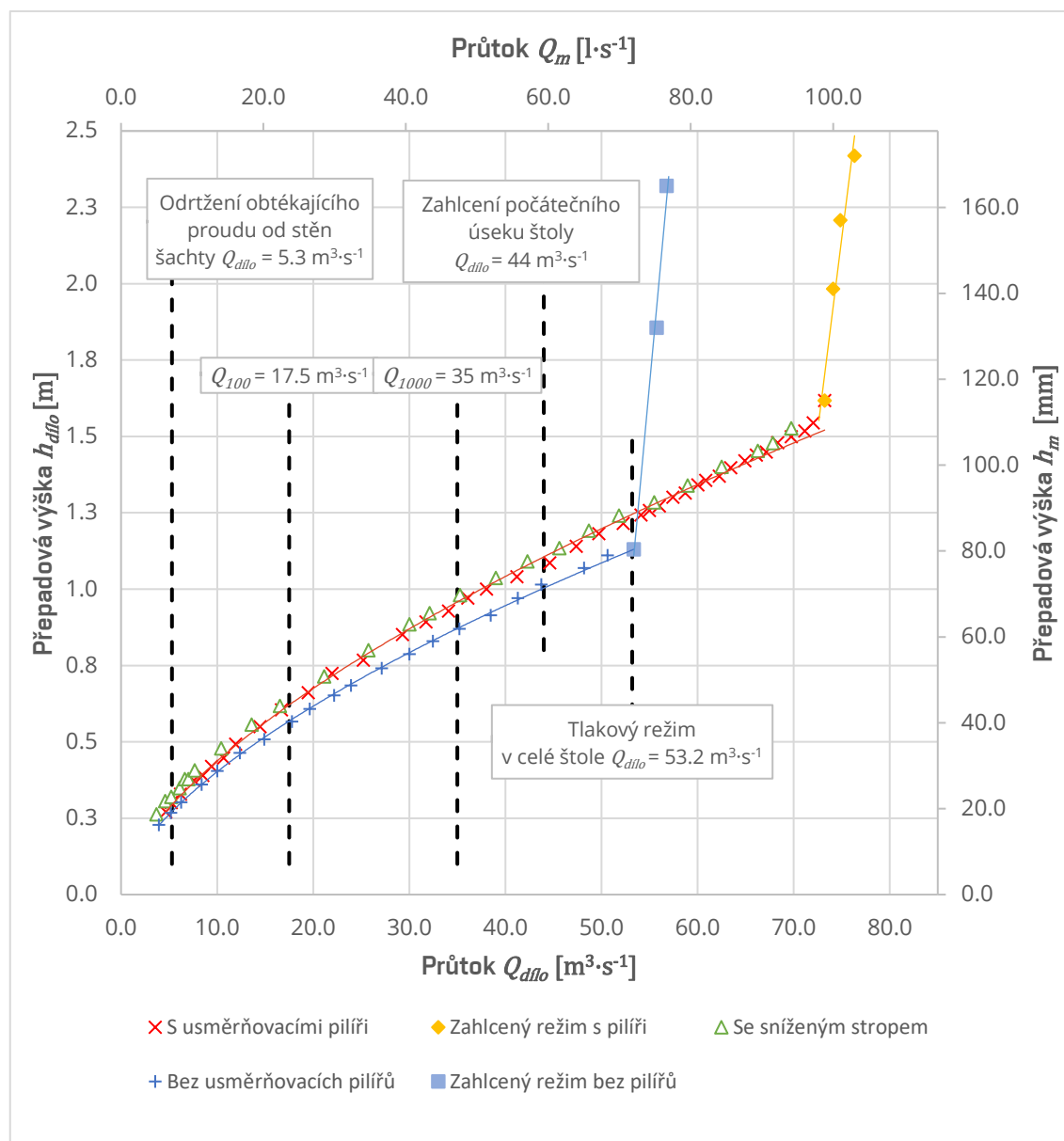


Foto. 26 – Převádění $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při variantě se sníženým stropem

10.5 Vyhodnocení

Závislosti přepadové výšky h a průtoku Q jsou vyjádřeny v grafu na Obr. 28. Křivky prokazují potvrzení s teorií. Především vliv pilířů. Pilíře sice při nižších průtocích snížily kapacitu, a proto je jejich křivka pod křivkou varianty bez pilířů. Ovšem bez pilířů došlo k zahlcení nálevky a platnosti závislosti výtoku otvorem o hodně dříve, čímž se výsledná kapacita této varianty podstatně snížila. Snížený strop na kapacitu vliv neměl. Křivka se dá prohlásit za shodnou s křivkou od varianty s pilíři.



Obr. 28 – Graf Q/h charakteristiky šachtového přelivu

10.5.1 Hladinový vír nad nálevkou

V případě nálevky bez pilířů se začal vytvářet hladinový vír. Pilíře tento vír eliminovaly. A to dokonce i při vyšších průtocích.



Foto. 27 – Neúplný vír nad nálevkou bez pilířů při $Q_{dlo} = 62,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Foto. 28 – Hladina bez rotace nad nálevkou s pilíři při $Q_{dlo} = 62,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Foto. 29 – Hladina bez rotace nad nálevkou s pilíři při $Q_{dlo} = 77,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

10.5.2 Dopad podtlakovosti

VD Pod Bukovcom má tvar nálevky s podtlakovým charakterem i pro nízké průtoky, což je vyobrazeno i na Obr. 26. V případě varianty bez pilířů tak přepadový paprsek kopíruje povrch nálevky i šachty. Ve skutečnosti jsou však na díle pilíře, které narušují kompaktní proud a v místech přerušení může proudit vzduch do prostoru šachty. Tímto vnikáním vzduchu zároveň dochází k odtrhávání proudu vody od povrchu nálevky a šachty a vytváří se kompaktní proudový válec uprostřed šachty viz Foto. 17, Foto. 18 a kapitola 10.3.

Jistý dopad má podtlakovost i na kapacitu. U nižších průtoků má přeliv s pilíři nižší kapacitu kvůli zastínění. V tomto případě se jedná o rozdíl 13,9 % oproti přelivu bez pilířů. Zastínění ovšem činí pouze 12 %. Zbylých 1,9 % se dá částečně vysvětlit právě „odlepením“ od podtlakové plochy a snížením součinitele přepadu. Z další části se dá 1,9 % vysvětlit také zavzdušněním.

10.5.3 Křížové vlny

Při průtoku $Q_{100\text{ dílo}} = 17,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vznikají za výtokem z konfuzoru malé křížové vlny, které nedosahují po strop štol.



Foto. 30 – Křížové vlny za konfuzorem při $Q_{100\text{ dílo}} = 17,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

10.5.4 Zahlčení vstupní části odpadní štolý

Mez zahlčení počátečního úseku štolý se projevuje v obou případech bez úpravy stropu velice podobně. Vodní tříšť zahltní celý průřez.



Foto. 31 – Zhlčená počáteční část štolý při variantě bez pilířů při $Q_{dilo} = 44,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Foto. 32 – Zhlčená počáteční část štolý při variantě s pilíři při $Q_{dilo} = 44,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

I při variantě se sníženým stropem dochází k podobnému zahlčení. Ovšem snížený strop se začne pozitivně projevovat při vyšších průtocích.



Foto. 33 – Zhlčená počáteční část štolý při variantě se stropem při $Q_{dilo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

10.5.5 Vliv stropu

Již výše bylo zmíněno, že efekt od stropu se projeví při vyšších průtocích. Příkladem je mez, $Q_{dilo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kdy ve variantách bez upraveného stropu došlo k trvalému zahlcení štoly po celé délce. Křížové vlny v tomto stavu byly již zcela potlačeny. Navíc se občas objevují výstřiky ze zavzdušňovacího otvoru při variantách bez upraveného stropu.



Foto. 34 – Zahlčení celé štoly při $Q_{dilo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ varianta bez upraveného stropu

Na rozdíl od toho se při variantě se stropem daří převádět průtok $Q_{dilo} = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ beztlakově, pouze se zahlcením počátečního úseku štoly.



Foto. 35 – Nezahlcený průtok při variantě se sníženým stropem při $Q_{dilo} = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Navíc ani nedochází k výstřikům ze zavzdušňovacího otvoru.

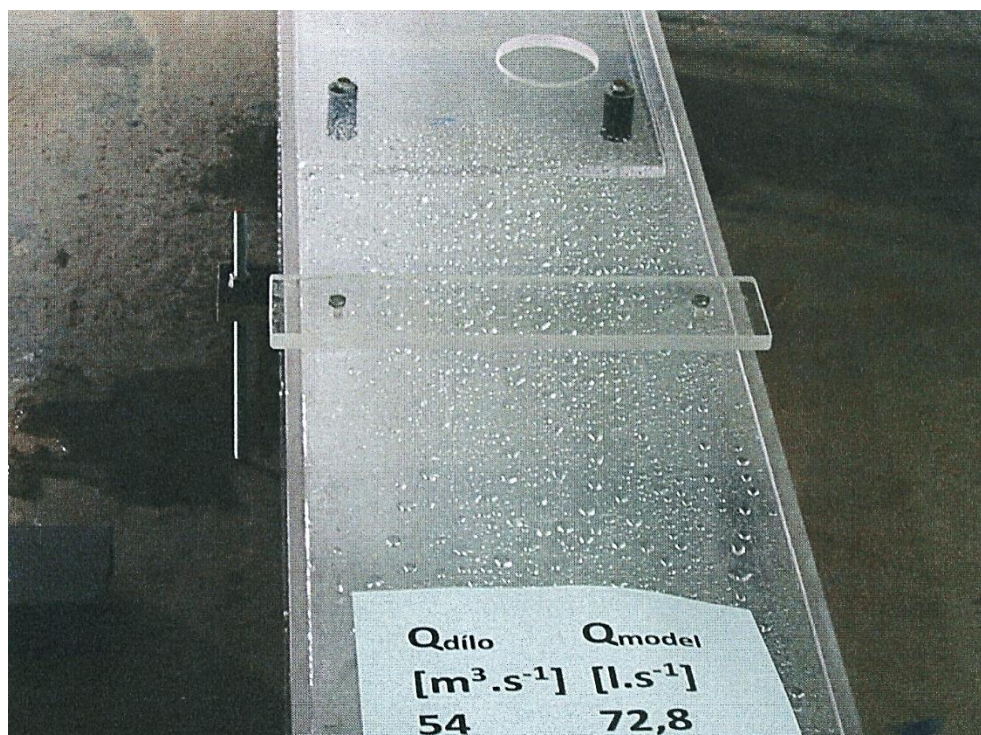


Foto. 36 – Průtok $Q_{dilo} = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pod sníženým stropem bez výstřiků ze zavzdušňovacího otvoru

Beztlakový režim při variantě se sníženým stropem se podařilo prokázat dokonce až do průtoku $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což je průtok, při kterém je trvale zahlcená nálevka s pilíři viz Foto. 29 a zároveň hladina vody v nádrži dosahuje koruny hráze. Proud odtéká štolou o volné hladině po

celé délce štol, je výrazně homogenizován a jsou potlačeny křížové vlny. U štol nedojde k zahlcení, jestliže bude kapacita navazujícího koryta dostatečná a nebude tak docházet ke zpětnému vzduť a ovlivnění poměrů ve štolě.



Foto. 37 – Průtok $Q_{dřlo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ neustálé vystřikování vody ze zavzdušňovacího otvoru při variantě bez stropu

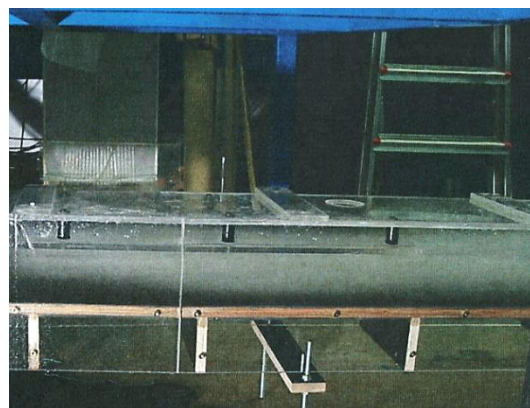


Foto. 38 – Průtok $Q_{dřlo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bez jakéhokoli vystřikování vody zavzdušňovacím otvorem při variantě se stropem

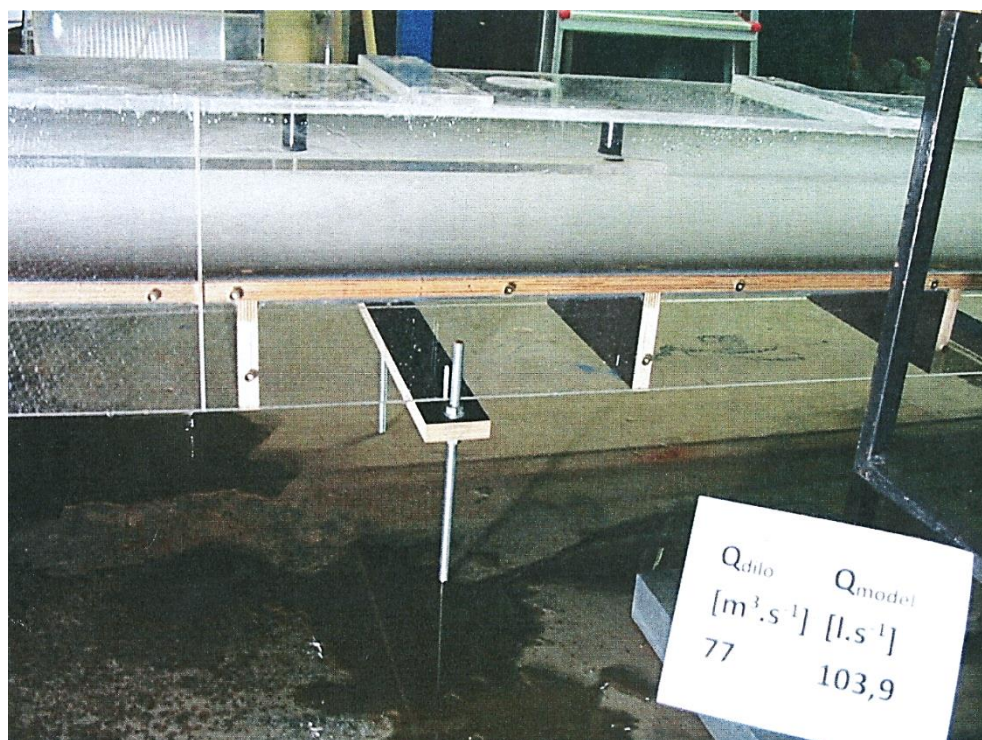


Foto. 39 – Zahlcená část štol pod sníženým stropem, dál bez zahlcení při $Q_{dřlo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Foto. 40 – Kompaktní proud, štol v tlakovém režimu po celé délce při variantě bez sníženého stropu při průtoku $Q_{dlo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

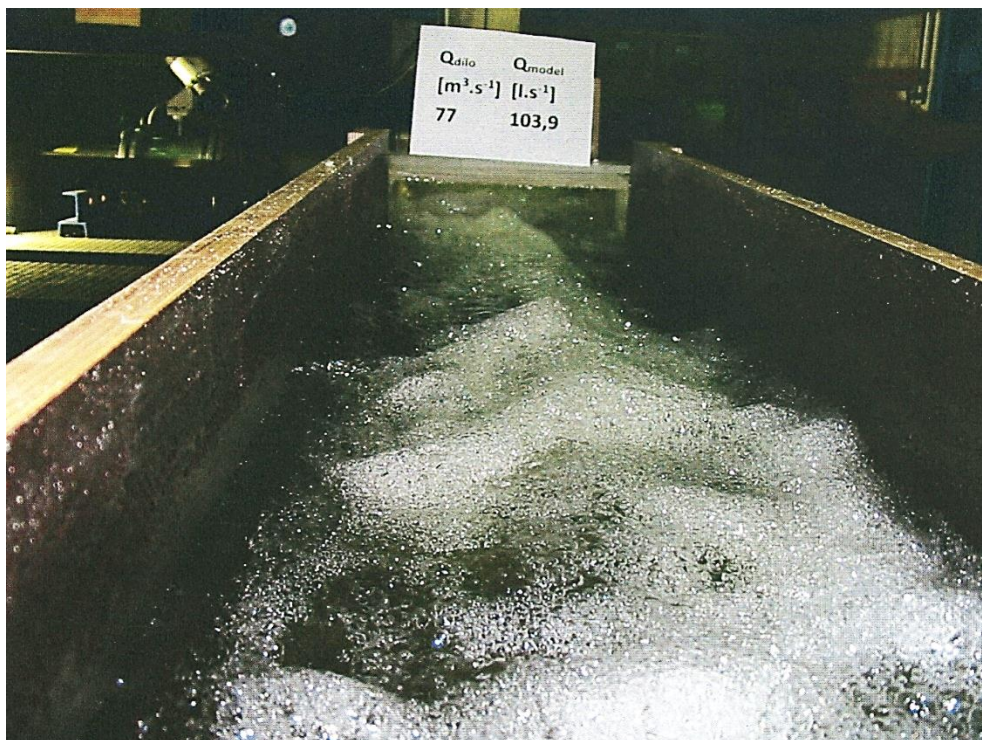


Foto. 41 – Protiproudění pohled na proudění o volné hladině při variantě se sníženým stropem při $Q_{dlo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

11 ZÁVĚR

V rešeršní části práce jsou shrnuty informace o současném poznání proudění přes přelivy. Obšírněji je potom popsáno proudění šachtovým přelivem i tato konstrukce samotná. Je rozebrán vliv pilířů na proudění i stádia proudění v šachtě.

Byl proveden výzkum na hydraulickém modelu vyhotoveném podle bezpečnostního objektu na VD Pod Bukovcom v měřítku $M_l = 14,06$ při přesně definovaných průtokových a hladinových poměrech.

Při provádění zkoušek byla zpozorována různá stádia. První stádium bylo typické odtrháváním přepadového paprsku od stěn šachty a tvorbou kompaktního válce v ose šachty. Zároveň se u tohoto stádia s různou četností odtrhával proud od obtékaných povrchů pilířů. Následovalo další stádium, kdy se paprsek přestal odtrhávat od stěn šachty a počáteční úsek šachty byl již zcela zahlcen vodní tříští a kompaktním proudem. I při tomto stádiu se občas, ovšem velmi málo, odtrhával proud na konci pilířů. Vzduch, který při odtrhnutí od pilířů pronikl do šachty se vracel protiproudě do atmosféry s hlasitým zvukovým efektem. Předposlední stádium proudění již mělo trvale zahlcenou celou odpadní štolu, a dokonce byly přelévány i podesty pilířů. V posledním stádiu se již jednalo o výtok otvorem, neboť nálevka byla zcela zahlcena.

Stádia proudění i další jevy byly zaznamenávány a jsou uvedeny v podobě fotografií. Mezní hodnoty průtoků jsou poté vyznačeny v grafu Q/h charakteristiky.

Usměrňovací pilíře se v praktické části ukázaly pozitivně, v souladu s očekáváními vyplývající z teorie. Pilíře zvýšily výslednou kapacitu a princip výtoku otvorem nastal později. Shoda s teorií u pilířů nastala i u nižších průtoků, kde vlivem nejen zastínění byla kapacita snížena. Toto snížení je však pouze 13,9 %, zatímco zvýšení celkové kapacity je až o 37 %. V případě varianty bez pilířů se totiž jednalo o hranici ovlivněnosti $Q_{dilo} = 53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a u varianty s pilíři až o průtok $Q_{dilo} = 73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Průtok, který je legislativně přípustný a odpovídající současnému stavu vodního díla byl stanoven na $Q_{dilo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při tomto průtoku začíná docházet k zahlcování počátečního úseku horizontální odpadní štol. Vodní tříšť zaplňuje celý protékaný profil. Při průtoku $Q_{dilo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ už dochází k tlakovému proudění po celé délce štol, což je již legislativně nepřipustné. Přípustné by to bylo pouze v případě štol ražené do skály, což není případ VD Pod Bukovcom. Hodnota průtoku tisícileté povodně $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je však naštěstí hodnota menší, než je stanovená kapacita $Q_{dilo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a tak se dá hovořit o dostatečné kapacitě.

Pomocí úprav počátečního úseku se však podařilo beztlakový průtok skrz odpadní štolu ještě zvýšit. Úprava počátečního úseku spočívá ve snížení stropu, a tak svým umístěním plynule navazuje na zúžený profil za kolenem. Snížený strop chrání zavzdušňovací otvor a zvyšuje jeho efektivitu provzdušňování, což bylo prokázáno i průtokem $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kdy po celé délce štol pokračovalo proudění o volné hladině neboli beztlakové proudění. U variant bez upraveného stropu bylo při tomto průtoku již dávno tlakové proudění po celé délce štol.

Materiály a konstrukce sníženého stropu by bylo vhodné ještě prozkoumat a vyhodnotit jak ze stavebního hlediska, tak i ekonomického. Mohlo by se jednat o námět k diplomové práci.

Zjištěné hodnoty platí pro objekt uvedeného tvaru a odpovídajícím proudovým okrajovým podmínkám. Výsledky stádií jsou použitelné ve výzkumné či projekční praxi.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

BOOR, B., J. KUTŠTÁTSKÝ a C. PATOČKA. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. 1. Praha, ALFA, n.p. Bratislava, 1968.

BROUČEK, M., M. KRÁLÍK a L. SATRAPA. Namáhání konstrukcí šachtových přelivů vyvozené axiálním a spirálním prouděním. *Vodní hospodářství* [online]. 2018, [cit. 2021-05-08]. ISSN 1211-0760. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/namahani-konstrukci-sachtovych-prelivu-vyvozene-axialnim-a%E2%80%AFspirálním-proudením/>

BROŽA, V., J. KRATOCHVÍL, P. PETER a L. VOTRUBA. *Přehrady*. 1. Praha, ALFA, 1984. 548 s.

CHVÁTAL, P. *Stanovení kapacitní charakteristiky dvouúrovňového pevného přelivu*. Brno, 2016. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

ČÁBELKA, J. a P. GABRIEL. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice I*. 1. Praha: Academia, 1987.

ČÁBELKA, J. Přínos hydrotechnického výzkumu k řešení šachtových přelivů. *Vodní hospodářství*. 1971, **1971A**(05). ISSN 1211-0760.

ČSN 75 2340. *Navrhování přehrad – Hlavní parametry a vybavení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 32 s. Třídící znak 752340.

ČSN 75 2410. *Malé vodní nádrže*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 48 s. Třídící znak 752410.

JANDORA, J. *Vodohospodářské stavby – Modul 01 – Základy hydrauliky*. Brno: VUT FAST, 2004. 64 s. ISBN: 0-471-355023- X.

JANDORA, J. a J. ŠULC. *Hydraulika*. Brno: VUT FAST, 2006. 178 s.

Kechut Reservoir. *Grand Resort Jermuk* [online]. 2019, [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.grandresortjermuk.com/kechut-reservoir/>

KRATOCHVÍL, J., M. JANDA a V. STARA. *Projektování přehrad*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1987. 101 s.

KYBAST, I. Oblasti prúdenia šachtovým priepadom. *Vodohospodárský časopis* [online]. 1987, **35**, str. 442-464 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://kramerius.lib.cas.cz/view/uuid:fd7f0baa-bc37-11e1-1027-001143e3f55c?page=uuid:fd7f0bab-bc37-11e1-1027-001143e3f55c>

MÄSIAR, E. a J. KAMENSKÝ. *Hydraulika pre stavebných inžinierov*. Bratislava: Alfa, 1985.

POLAR TELEVIZE OSTRAVA, S.R.O. Obyvatelé Litultovic na Opavsku chrání proti velké vodě nově vybudovaná suchá nádrž Choltický. *Polar* [online]. 2020, [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://polar.cz/zpravy/pr/11000014336/obyvatele-litultovic-na-opavsku-chrani-proti-velke-vode-nove-vybudovana-sucha-nadrz-cholticky>

ŘÍHA, J. *Hydrotechnické stavby II – Modul 01 – Přehrady*. Brno: VUT FAST, 2006. 160 s.

SAYADZADEH, F., S. H. MUSAVI-JAHROMI, H. SEDGHI a KHOSROJERDI. Pyramidal vortex breakers influences on the flow discharge of morning glory spillway. *Ain Shams*

Engineering Journal [online]. 2020, **11**(2), str. 455–463 [cit. 2021-05-08]. ISSN 20904479. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.013>

SMP CZ, A.S. *Zvýšení retenční funkce vodního díla Labská, Špindlerův Mlýn – SMP CZ* [online]. 2019, [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.smp.cz/zvyseni-retencni-funkce-vodniho-dila-labska-spindleruv-mlyn-6333>

ŠAFÁŘ, R. a J. ŠULC. Experimentální výzkum přepadu přes přeliv s kruhově zaoblenou korunou. *Vodní hospodářství* [online]. 2012, **2012**(7), str. 236-241 [cit. 2021-05-09]. ISSN 121-0760. Dostupné z: <https://www.vodnihospodarstvi.cz/ArchivPDF/vh2012/vh07-2012.pdf>

ŠULC, J. *Hydraulický modelový výzkum proudění v prostoru šachtového přelivu a odpadní štolý bezpečnostního objektu VD Pod Bukovcom*. 2020.

VESELÝ, J. *Vodohospodářské stavby – Modul 03 – Vodní stavby*. Brno: VUT FAST Ústav vodních staveb, 2004. 64 s.

VD Labská. *HG Partner* [online]. 2012, [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <http://www.hgpartner.cz/400-2/>

Vyhláška č. 471/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva zemědělství o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly, 2001. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/Legislativa-MZe_uplna-zneni_vyhlaska-2001-471-voda.html

Vyhláška č. 590/2002 Sb. Vyhláška o technických požadavcích pro vodní díla, 2002. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/Legislativa-MZe_uplna-zneni_vyhlaska-2002-590-voda.html

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), 2001. ISSN 1211-1244. Dostupné z: <http://www.mvcr.cz/soubor/sbirka-zakonu-dokumenty-sb101-10-pdf.aspx>

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Jezový přeliv (Jandora a Šulc, 2006, s. 70).....	5
Obr. 2 – Ostrohranný přeliv (Jandora a Šulc, 2006, s. 64).....	6
Obr. 3 – Přeliv se širokou korunou (Jandora a Šulc, 2006, s. 64).....	7
Obr. 4 – Půdorysy přelivů (Jandora a Šulc, 2006, s. 64–65).....	7
Obr. 5 – Nedokonalý přepad přes jez (Jandora a Šulc, 2006, s. 70)	8
Obr. 6 – Bachmětěvův grafikon mezních hodnot (Jandora, 2004, s. 33).....	9
Obr. 7 – Nedokonalý přepad na ostrohranném přelivu (Jandora a Šulc, 2006, s. 68).....	13
Obr. 8 – Ostatní ostrohranné přelivy (Jandora, 2004, s. 31)	14
Obr. 9 – Souřadný systém, dotykový bod a základní trojúhelník přelivných ploch	15
Obr. 10 – Poloosy podtlakové elipsovité přelivné plochy.....	19
Obr. 11 – Schéma šachtového přelivu.....	23
Obr. 12 – Přibližující se přepadové paprsky	23
Obr. 13 – Fáze přepadů a jejich rovnice na šachtovém přelivu (Boor et al., 1968, s. 238).....	25
Obr. 14 – Přepad přes kruhový ostrohranný přepad (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 133).....	27
Obr. 15 – Šachtový přeliv s proudnicovou plochou (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 133).....	27
Obr. 16 – Šachtový přeliv s prahem (Mäsiar a Kamenský, 1985, s. 135).....	29
Obr. 17 – Clona proudu na konvexní straně	30
Obr. 18 – Stádium 1 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 18)	31
Obr. 19 – Stádium 2 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 18)	32
Obr. 20 – Stádium 3 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 18)	33
Obr. 21 – Přejít mezi stádii 3 a 4 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 19)	34
Obr. 22 – Stádium 4 proudění šachtovým přelivem (Šulc, 2020, s. 19)	34
Obr. 23 – Stádium 5 proudění šachtovým přelivem (Kybast, 1987, s. 449)	35
Obr. 24 – Q/h křivka s různými úpravami nálevky.....	37
Obr. 25 – Schéma VD Pod Bukovcom	46
Obr. 26 – Podtlaková plocha díla VD Pod Bukovcom	48
Obr. 27 – Schéma s přidáním stropem	60
Obr. 28 – Graf Q/h charakteristiky šachtového přelivu	63

14 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Hodnoty součinitele zatopení pro přepad přes jez	10
Tab. 2 – Hodnoty součinitele šikmosti.....	10
Tab. 3 – Hodnoty součinitele přepadu pro obdélníkový průřez jezu	10
Tab. 4 – Souřadnice typové přelivné Scimemiho plochy pro $h = 1,0$	16
Tab. 5 – Souřadnice dotykového bodu T Scimemiho typové přelivné plochy.....	16
Tab. 6 – Souřadnice Smetanovy typové přelivné plochy pro $h = 1,0$	17
Tab. 7 – Souřadnice dotykového bodu T Smetanovy typové přelivné plochy.....	17
Tab. 8 – Souřadnice eliptické podtlakové plochy při $r_k = 1,0$	20
Tab. 9 – Hodnoty součinitele přepadu eliptické plochy	20
Tab. 10 – Součinitel zatopení eliptické přelivné plochy	21
Tab. 11 – Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni (Vyhláška č. 590/2002)	40
Tab. 12 – Převod rozměrů VD a model	47
Tab. 13 – Q/h hodnoty bez pilířů	53
Tab. 14 – Q/h hodnoty s pilíři	55
Tab. 15 – Přehled stádií pro variantu s pilíři bez úprav vstupní části štoly.....	59
Tab. 16 – Q/h hodnoty s přidaným stropem.....	61

15 SEZNAM FOTOGRAFIÍ

Foto. 1 – Sdružený objekt (POLAR televize Ostrava, s.r.o., 2020)	22
Foto. 2 – Model VD Pod Bukovcom – vliv pilířů na vznik vírů.....	37
Foto. 3 – Model VD Jirkov vtoková část s žebry (Brouček et al., 2018)	38
Foto. 4 – Přeliv Kechut Arménie (Kechut Reservoir, 2019).....	39
Foto. 5 – Ucpávání česlí na bezpečnostním přelivu (VD Labská, 2017)	41
Foto. 6 – VD Labská po úpravách proti ucpávání (SMP CZ, a.s., 2019).....	42
Foto. 7 – Pohled na šachtu, koleno a počáteční úsek modelu	47
Foto. 8 – Nálevka bez pilířů a zaústění vertikálního přítoku s homogenizačním sítím (Šulc, 2020, s. 26).....	49
Foto. 9 – Nálevka s pilíři (Šulc, 2020, s. 26)	49
Foto. 10 – Protiproudění pohled na štolu s demontovaným stropem pro zaměření vodní hladiny	50
Foto. 11 – Digitální hrotové měřidlo na otevřené odpadní štolě (Šulc, 2020, s. 28).....	51
Foto. 12 – UZV čidlo pro snímání polohy hladiny a ocelová měrka (Šulc, 2020, s. 28).....	51
Foto. 13 – Indukční průtokoměr ELA na přítokovém potrubí	52
Foto. 14 – Hodnoty průtoků a přepadové výšky zobrazené na displeji	52
Foto. 15 – Bez pilířů, dokonalý přepad $Q_{dilo}=14,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	54
Foto. 16 – Bez pilířů, hranice ovlivněnosti $Q_{dilo} = 53,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	54
Foto. 17 – Kompaktní proud uprostřed šachty při $Q_{dilo} = 5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	56
Foto. 18 – Kompaktní proud uprostřed šachty při $Q_{dilo} = 5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	56
Foto. 19 – Dokonalý přepad přes šachtový přeliv při $Q_{dilo} = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	57
Foto. 20 – S pilíři při $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	57
Foto. 21 – Vodní tříšť v šachtě při $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	58
Foto. 22 – Při $Q_{dilo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bez odtržení proudu.....	58
Foto. 23 – Při $Q_{dilo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s odtržením proudu.....	58
Foto. 24 – Trvalé zahlcení s pilíři, nedokonalý přepad při $Q_{dilo} = 77,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	59
Foto. 25 – Výtok ze sníženého stropu při $Q_{dilo} = 25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	62
Foto. 26 – Převádění $Q_{1000 \text{ dilo}} = 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při variantě se sníženým stropem	62
Foto. 27 – Neúplný vír nad nálevkou bez pilířů při $Q_{dilo} = 62,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	64
Foto. 28 – Hladina bez rotace nad nálevkou s pilíři při $Q_{dilo} = 62,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	64
Foto. 29 – Hladina bez rotace nad nálevkou s pilíři při $Q_{dilo} = 77,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	64
Foto. 30 – Křížové vlny za konfuzorem při $Q_{100 \text{ dilo}} = 17,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	65
Foto. 31 – Zahlčená počáteční část štolý při variantě bez pilířů při $Q_{dilo} = 44,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	66
Foto. 32 – Zahlčená počáteční část štolý při variantě s pilíři při $Q_{dilo} = 44,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	66
Foto. 33 – Zahlčená počáteční část štolý při variantě se stropem při $Q_{dilo} = 44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	66
Foto. 34 – Zahlčení celé štolý při $Q_{dilo} = 53,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ varianta bez upraveného stropu	67
Foto. 35 – Nezahlčený průtok při variantě se sníženým stropem při $Q_{dilo} = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	68
Foto. 36 – Průtok $Q_{dilo} = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pod sníženým stropem bez výstřiků ze zavzdušňovacího otvoru	68
Foto. 37 – Průtok $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ neustálé vystřikování vody ze zavzdušňovacího otvoru při variantě bez stropu	69

Foto. 38 – Průtok $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bez jakéhokoli vystřikování vody zavzdušňovacím otvorem při variantě se stropem.....	69
Foto. 39 – Zahlcená část štoly pod sníženým stropem, dál bez zahlcení při $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	69
Foto. 40 – Kompaktní proud, štola v tlakovém režimu po celé délce při variantě bez sníženého stropu při průtoku $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	70
Foto. 41 – Protiproudění pohled na proudění o volné hladině při variantě se sníženým stropem při $Q_{dilo} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	70

16 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Popis	Jednotka
t	tloušťka stěny	m
h	výška přepadového paprsku	m
h_d	úroveň hladiny dolní vody	m
d	zhloubení vývaru	m
s	odlehlost přelivné hrany od dolního dna	
H	spád hladin	m
$\left(\frac{H}{s}\right)_*$	mezní hodnota pro nedokonalý přepad	m
σ_z	součinitel zatopení	
σ_s	součinitel šikmosti	
m	součinitel přepadu	
b_0	účinná šířka přelivu	m
h_0	energetická přepadová výška	m
g	tíhové zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Q	průtok	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
b	šířka přelivu	m
n	počet zúžení	
ξ	součinitel kontrakce	
α	Coriolisovo kritérium	
v_0	přítoková rychlost	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
g	tíhové zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
k	rychlostní výška	m
μ	součinitel přepadu daného přelivu	
h_z	odlehlost přelivné hrany od dolní vody	m
s_l	odlehlost přelivné hrany od horního dna	m
h_n	návrhová přepadová výška	m
r_k	poloměr náhradní kružnice elipsových ploch	m
D	průměr šachty	m
l	délka přelivné hrany/koruny	
r	poloměr nálevky	m
k	součinitel závislý na průměru přelivu	
T	dotykový bod	

y	vertikální souřadnice	m
x	horizontální souřadnice	m
M_l	měřítka délek modelu	
M_v	měřítka rychlostí modelu	
M_Q	měřítka průtoků modelu	
n_m	přepočtená modelová drsnost	
$h_{m \min}$	minimální přepadová výška na modelu	mm
$Q_{dilo \min}$	minimální průtok na díle použitelný na modelu	$m^3 \cdot s^{-1}$
u_m	minimální povrchová rychlost na modelu	$m \cdot s^{-1}$
$Re_{m \min}$	minimální Reynoldsovo kritérium na modelu	
q	specifický průtok	$m^2 \cdot s^{-1}$
ν	součinitel kinematické viskozity	$m^2 \cdot s^{-1}$
$Q_{m \min}$	minimální průtok pro model	$l \cdot s^{-1}$
a_m	minimální délka strany otvoru na modelu	mm
H_T	odlehlost výtokového otvoru a hladiny na modelu	mm
Q_3	průtok na modelu zobrazovaný na displeji	$l \cdot s^{-1}$
H_2	přepadová výška na modelu z displeje	mm
Q_m	průtok na modelu	$l \cdot s^{-1}$
Q_{dilo}	průtok na díle	$m^3 \cdot s^{-1}$
h_m	přepadová výška na modelu	mm
h_{dilo}	přepadová výška na díle	m

17 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

VD	vodní dílo
TBD	technickobezpečnostní dohled
UZV	ultrazvuk
VUT	Vysoké učení technické
FAST	Fakulta stavební

18 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Velký graf Q/h

Q/h charakteristika šachtového přelivu

Průtok Q_m [l·s⁻¹]

